

**LEXIQUE
DE PHILOSOPHIE NATURELLE***

**où science et philosophie
s'observent d'une manière critique
comme participants d'une même culture**

Simon Diner
si.diner@wanadoo.fr

(*Cher lecteur, écris moi*)

Felix qui potuit rerum cognoscere causas
Virgile

Everything should be as simple as it is, but not simpler
Albert Einstein

*Nous devrions retrouver le
projet d'une « philosophie de
la nature »...*
René Thom

*Deux choses menacent le
monde : l'ordre et le désordre.*
Paul Valéry

*Vous ferez de la géométrie et de la métaphysique tant qu'il vous
plaira ; mais moi qui suis physicien et chimiste, qui prends les corps dans
la nature et non dans ma tête ; je les vois existants, divers, revêtus de
propriétés et d'action ; et s'agitant dans l'univers comme dans un
laboratoire.*
Denis Diderot

*L'intention de ce livre est de collecter brièvement
ce que celui qui cherche la sagesse
doit savoir au début de son étude,
de manière à ce qu'il soit pour lui comme un guide
pour ce qu'il veut étudier. [...]*

*La plupart de ce que je dis à propos des sciences
sont les mots des chefs des philosophes et des experts,
puisque je n'ai rien innové par moi-même
si ce n'était que je les ai rassemblés des livres
dans lesquels ils sont éparpillés*

*(Shem Tov Ibn Falaquera,
Reshit hokhmah)*

• • •

Au XII^e siècle le philosophe juif Maïmonide écrit, en arabe, un grand traité « Le guide des égarés », sous la forme d'un lexique où sont examinés les mots de la Bible afin de montrer dans chaque cas leur emploi métaphorique ou symbolique, évitant toute référence à une corporalité ou à une substantialité de Dieu, qui n'a pas d'autres attributs que de ne pas en avoir.

Le lexique ci dessous a pour ambition d'être un guide des égarés de la philosophie naturelle contemporaine, où l'activité de la science se révèle une activité symbolique et métaphorique à la recherche de la substance de la réalité qui lui échappe le plus souvent. Un guide dans le labyrinthe du « Comme si. Comme ça ». Une chasse aux attributs d'où l'on revient souvent bredouille.

Tout le lexique est traversé par la problématique du réalisme et de l'instrumentalisme qui domine depuis toujours l'activité de la science. Pour ou contre le nominalisme. Les mots et les choses. Le vrai ou l'imitation. Le mot chien ne mord pas. Le mot vide est vide.

Il faut s'attendre à trouver ici des faits de la nature et tout juste ce qu'il faut de faits de l'esprit, nécessaires pour comprendre la construction de la réalité par l'activité de la pensée. On pourra regretter que la dimension psychologique de la vision du monde soit peu prise en compte.

Ce lexique exprime le savoir modeste d'un physicien qui cherche à réunir les concepts et les informations minimales nécessaires à l'honnête homme pour la lecture des ouvrages de vulgarisation scientifiques contemporains et pour la constitution d'une vision du monde appropriée. Il cherche à être accessible au plus large public cultivé. Entre dictionnaire et encyclopédie il se caractérise par la modestie de ses articles qui cherchent néanmoins à satisfaire à la rigueur scientifique et philosophique, sans la moindre formule mathématique. Ceci entraîne bien des périphrases. Il essaye de constituer le savoir d'un honnête homme au XXI^e siècle. Quoique inachevé sa mise en ligne présente l'intérêt d'une vision unifiée dont le lecteur aura sans doute plaisir à prendre connaissance. Il s'appuie sur de nombreuses sources qu'il cite souvent sans les nommer, voulant par là manifester l'unité d'une pensée qui croit en un réalisme transcendantal par delà le profond symbolisme qui règne en physique.

Le lecteur pardonnera sans doute l'existence d'articles d'histoire des sciences plus prolixes. Sur l'astronomie de Ptolémée. Sur la théorie des systèmes dynamiques. Sur l'histoire du vide. Sur l'alchimie.

L'auteur a souvent lu avec délice les articles de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, dont le texte est disponible sur le web. Certains articles sont reproduits pour le plaisir du lecteur. Leur ton et leur esprit sont un enchantement. Les savoirs ont changé mais les questionnements restent bien proches. L'auteur s'est même permis de ressusciter d'Alembert et d'imaginer un rêve de d'Alembert en notre siècle.

Au lecteur mis en appétit et prêt à se lancer dans des lectures plus approfondies on peut recommander deux encyclopédies sur le web : Wikipédia (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>) à prendre avec précaution à cause de l'anonymat des articles dont certains sont cependant remarquables, et Stanford Encyclopedia of Philosophy (<http://plato.stanford.edu>) le monument du siècle. Ne pas oublier cependant le « *Dictionnaire de la Philosophie* » de *L'encyclopedia Universalis*. Très récemment se fait jour une initiative très savante pour doubler Wikipédia avec une encyclopédie scientifique dont les articles sont écrits par les plus grands spécialistes mondiaux. Malheureusement ce n'est pas une encyclopédie grand public (<http://www.scholarpedia.org>).

Cet ouvrage présente l'originalité d'être écrit d'une seule main et de présenter une cohérence conceptuelle interne. Rares sont les lexiques ou les dictionnaires récents présentant ce caractère. Dans le passé de telles entreprises étaient plus courantes. Sans parler de l'Encyclopédie de Diderot/ d'Alembert, citons le « *Dictionnaire*

universel des sciences, des lettres et des arts » de Bouillet (1854), le « *Dictionnaire de la langue française* » de Littré (1863)- disponible sur le web depuis 2007- ou le « *Vocabulaire technique et critique astérisquede la philosophie* » de Lalande (1927). Un ouvrage fait exception, celui de James Trefil : « *The nature of science . An A-Z guide Certainsto the laws and principles governing our universe* » (2003) dont le titre de la traduction russe reflète mieux le contenu : « *La nature de la science. 200 lois gouvernant la constitution du monde* »

Notre ouvrage n'a aucune prétention encyclopédique, il se compose de sujets relevant des goûts intellectuels de l'auteur. Le lecteur ne doit pas croire pouvoir y étudier une question scientifique ou philosophique(ce n'est pas un ouvrage de vulgarisation), mais considérer ces textes comme une entrée en matière donnant une vision générale. Un ouvrage qui s'adresse à ceux qui savent un peu et veulent organiser leur savoir. Une entreprise pour baliser le vocabulaire de la philosophie naturelle. Ah le vocabulaire !! Certains termes utilisés ne figurent pas dans les entrées, ils marquent les frontières que cet ouvrage ne peut franchir.

Que le lecteur pardonne si l'auteur a parfois cédé à un certain pédantisme en voulant élargir le débat philosophique.

*Les termes marqués d'un astérisque * renvoient à une entrée du lexique ou à une entrée du Répertoire des Personnages, disponible sur le site, lorsqu'il s'agit d'un nom propre.*

ABDUCTION

ABSOLU / RELATIF

La notion d'absolu/relatif imprègne toute la Philosophie Naturelle. L'objet final de la physique serait de définir des absolus, soit des invariants* par rapport à tout changement de repère ou de conditions d'observation*. Mais comme le dit Einstein* « le mouvement, du point de vue de l'expérience possible, apparaît toujours comme le mouvement relatif d'un objet par rapport à un autre..... Jamais on n'observe un mouvement absolu, qui serait un mouvement par rapport à l'espace* ». Cependant en mécanique, le mouvement absolu d'un point est le mouvement de ce point rapporté à un repère* fixe ; par opposition à mouvement relatif, qui est ce même mouvement rapporté à un repère mobile.

Le débat philosophique et scientifique qui s'ouvre est d'une grand ampleur et rejoint la problématique du contexte* et du contextualisme*. On n'échappe pas à la contextualité ni en mécanique classique (débat réel/fictif* à propos des forces fictives*, relativités*), ni en mécanique quantique (contextualité* en mécanique quantique). Seuls les attributs* comme la masse* ou le spin* sont des absolus. L'attribut, n'a d'ailleurs de réalité que dans la mesure où il détermine la substance*, cette dernière demeurant, en fin de compte, l'absolu unique et total.

ABSTRACTION

Action consistant à ne retenir d'un objet ou d'un phénomène qu'un certain nombre de caractéristiques jugées représentatives. Résultat de cette action. L'abstraction a de nombreux points communs avec l'idéalisation*. Bien des discours se constituent au moyen de l'abstraction. La science, si l'on admet le rôle de l'induction*, procéderait par abstraction pour la constitution de ses lois générales et de ses théories*. Un peintre peignant une scène en atelier procède par abstraction.

L'abstraction s'éloigne plus ou moins de l'image que l'on se fait de la réalité. Ce qui explique, qu'après bien des réticences, les peintres du début du XX siècle aient dénommé abstrait un art non figuratif.

Le grand chimiste Chevreul a toute sa vie défendu l'idée qu'il n'y a pas de faits* expérimentaux concrets mais seulement des faits abstraits résultant de notre jugement sur le réel. Ses idées n'ont pas été suivies sauf par Claude Bernard son élève. Cette idée que les faits* sont chargés de théorie a été avancée par Duhem* puis par Quine (Thèse de Duhem-Quine*) et a beaucoup influencé Kuhn* qui la reprenait d'un auteur peu connu.

L'abstraction donne en général naissance à des signes*. Une conception de l'abstraction dont la filiation remonte à Helmholtz* et qui sera reprise par Hertz* et Cassirer*. L'abstraction garantit une stabilité des choses en les soustrayant à la contingence* du réel. Une stabilité structurelle* oserions nous dire. (Cf. Stabilité structurelle-Problématiques et enjeux*).

ABSTRAIT/CONCRET

Opposition entre un objet abstrait et l'objet naturel dans son intégrité.

La problématique abstrait/concret n'est pas nouvelle et l'on peut tout au plus dire que le début du XX^e siècle la voit ressurgir d'une manière spectaculaire par ses manifestations artistiques. Mais elle réapparaît aussi dans la démarche scientifique, en mathématique et en physique, ce qui n'est sans doute plus qu'une simple coïncidence.

Cette problématique va s'enrichir dans la seconde moitié du siècle, par le développement de la cybernétique* et de ses stratégies de modélisation. Il ne faut pas confondre abstraction et modélisation même si les deux font bon ménage. Ce qui est important dans la notion d'abstraction ce n'est pas l'idée de simplification, qui peut être essentielle pour un modèle, mais l'idée d'objectivation de certaines propriétés ou relations, indépendamment des objets concrets qu'elles concernent. C'est privilégier les signes* au dépens des objets*, ce qui est la démarche de tout discours scientifique.

Ainsi peut on valablement se demander si, dans la théorie quantique, le vide* est un signe ou un objet. L'abstraction de la théorie va se révéler par le fait que c'est un signe auquel on a bien du mal à faire correspondre un objet.

En introduisant le concept de force*, puis celui de champ* pour rendre compte de l'interaction entre objets concrets, la physique ajoute à la légitimité des concepts abstraits qui s'expriment en langage mathématique. Dans la notion de champ le réel n'apparaît plus comme offert à l'inspection d'un regard attentif mais comme un ensemble de possibles à solliciter expérimentalement.

ACCELERATION

Rapidité avec laquelle la vitesse d'un mobile varie. Cette quantité joue un rôle central dans la dynamique, puisqu'il n'y a d'accélération que par l'effet d'une force*. Newton* a formulé la loi fondamentale de la dynamique comme l'égalité entre la force appliquée à un corps et le produit de sa masse* par l'accélération résultante.

Lorsqu'un mobile se déplace selon une trajectoire, la vitesse en un point est la dérivée* première de la fonction représentant la trajectoire ; le vecteur vitesse est un vecteur tangent à cette courbe. L'accélération est la dérivée seconde et le vecteur qui la représente est aussi tangent à la trajectoire.

C'est un des faits marquant de la philosophie naturelle* que la force* soit liée à la seule accélération (dérivée seconde) et ne fasse pas intervenir de dérivées d'ordre supérieur. Ce simple fait simplifie considérablement le discours de la physique dans son ensemble.

ACCELERATEUR (DE PARTICULES)

ACCIDENT

L'accident c'est ce qui se produit en dehors de la nature des choses. C'est ce qui ne fait pas partie de l'essence* des choses ou ce qui vient modifier leur substance*. Avoir les cheveux blonds ou bruns est un accident pour les cheveux. On attribue souvent certains accidents au hasard*.

Alors que la substance est une entité de base existante en soi, les accidents sont ce qui vient modifier la substance. Les accidents peuvent apparaître et disparaître sans que la chose perde son identité, alors qu'une chose ne peut cesser d'être substance sans perdre son identité.

Le fait pour un objet quantique* d'être dans un état excité* est un accident.

ACIDE AMINE

Molécule organique porteuse sur le même atome de carbone d'un groupement amine NH_2 et d'un groupement acide $\text{C}(\text{O})\text{OH}$. Dans la constitution des protéines* il n'y a que 20 acides aminés présents, différant par leur groupe latéral.

Acides neutres et hydrophobes

**Alanine Ala
Valine Val
Leucine Leu
Isoleucine Ile
Proline Pro
Tryptophane Trp
Phénylalanine Phe
Méthionine Met**

Acides neutres et polaires

Glycine Gly

Serine Ser
 Threonine Thr
 Tyrosine Tyr
 Cystéine Cys
 Glutamine Glu
 Asparagine Asn

Acides amines basiques

Lysine Lys
 Arginine Arg
 Histidine His

Acides amines acides

Acide aspartique Asp
 Acide glutamique Glu

ACIDE ET BASE

ACIDE DESOXYRIBONUCLEIQUE (Cf. ADN)

ACIDE NUCLEIQUE

Un acide nucléique est une chaîne de nucléotides liés entre eux. Chaque nucléotide est constitué d'une base purique ou pyrimidique, un cycle composé de carbone et d'azote, d'un sucre cyclique à cinq atomes de carbone et d'un groupe phosphate. Il y'a dans chaque acide nucléique quatre types de bases, deux purines, l'adénine et la guanine, et deux pyrimidines, la cytosine et la thymine dans l'ADN*, la cytosine et l'uracile dans l'ARN*. Entre l'ADN et l'ARN c'est la nature du sucre qui diffère. Voilà l'alphabet de l'hérédité* dans la biologie moléculaire*.

ACIDE RIBONUCLEIQUE (Cf. ARN*)

ACTE (Cf. ACTUEL*)

ACTION (Mécanique)

En Mécanique, le mot action exprime tantôt l'effort qu'une force déploie contre un corps (ex; l'action à distance*), tantôt l'effet, le mouvement résultant de cet effort. Un des axiomes fondamentaux de la Mécanique dit que la réaction est toujours égale à l'action (troisième loi de Newton*). Mais chez Leibniz*, puis Maupertuis*, le mot action désigne une caractéristique du mouvement lui-même. Une fonction des

variables décrivant l'état et définissant totalement la dynamique du système.

Le principe de moindre action de Maupertuis dit que lorsqu'il survient quelque changement dans l'état des corps, la "quantité d'action" qu'ils perdent est la plus petite possible. C'est ce dernier sens qui va faire fortune dans la Physique au point que l'Action va devenir une notion fondamentale au même titre que la Force* ou l'Energie*.

Historiquement en mécanique l'action* a été introduite comme l'intégrale* par rapport au temps de la différence entre l'énergie cinétique* et l'énergie potentielle* du système, la fonction de Lagrange ou lagrangien*. Les équations de Newton de la mécanique s'obtiennent par extrémisation, de cette action,

Toutes les théories de la Physique peuvent s'exprimer à l'aide d'un principe de moindre action (action stationnaire*), à condition de définir chaque fois l'action d'une manière spécifique convenable. C'est la formulation de la théorie à l'aide d'un principe variationnel*. Les équations de la théorie s'obtiennent comme les conditions d'extrémisation. La formulation des théories physiques au moyen de l'action prend un intérêt particulier pour les théories des champs, car le rôle fondamental qu'y jouent les principes d'invariance* s'y exprime de la manière la plus commode et la plus compacte comme invariance de l'action.

Cette universalité de la notion d'Action- la constante de Planck représente une action- liée sans doute à l'invariance adiabatique* et à l'invariance relativiste (partagées avec l'entropie*) plaide en faveur d'une interprétation physique générale, liée sans doute à la notion d'information. Mais il subsiste bien des mystères autour du concept d'action.

ACTION A DISTANCE

Conception selon laquelle les interactions entre corps s'effectuent à distance sans intervention d'un milieu intermédiaire, ce qui constitue l'action par contact. L'éther* était précisément un tel milieu, que les opposants à l'idée d'action à distance cherchaient à introduire. Le concept de champ* a été introduit pour éliminer l'action à distance tout en se substituant à l'éther. Le vide quantique remplit ces mêmes fonctions dans le cadre des théories de champs*, tout en se laissant souvent imaginer comme un nouvel éther.

La théorie de la gravitation* de Newton est une théorie avec action à distance. La corrélation quantique* dans un état enchevêtré* témoigne d'une influence à distance, qui n'est pas une véritable action, car il n'y a pas de transmission d'information. (Cf. Non-localité*)

Dans la physique quantique les interactions entre particules se décrivent comme un échange de particules virtuelles*. L'interaction électromagnétique se décrit comme émission et absorption de photons virtuels. Il y a une distinction claire entre les particules en interaction (la matière*) et les particules qui transportent l'interaction, les quanta* des champs. Cette image semble vérifiée expérimentalement pour les interactions fortes*, faibles* et électromagnétiques*, qui sont des actions à courte distance.

L'observation d'un transporteur de l'interaction gravitationnelle (le graviton*), interaction à longue distance, reste problématique. Quant à la corrélation quantique* on ne sait tout simplement pas comment elle s'exerce, d'autant plus qu'elle est instantanée.

ACTION EN RETOUR (Feedback) (Cf. Rétroaction*)

ACTION PAR CONTACT (Cf. Action à distance*)

ACTION STATIONNAIRE (Principe d') (Principe de moindre action*)

ACTUALISME

L'actualisme est une position philosophique selon laquelle tout ce qui est – c'est à dire tout ce qui peut, en un sens quelconque, être qualifié d'existant – est actuel*. Etre c'est exister. L'actualisme s'oppose au possibilisme*.

ACTUEL

Modalité* de l'être* opposée à la puissance*. Il s'agit de l'existence* réalisée, de l'existence en acte. La physique postmédiévale, dans sa volonté anti-aristotélicienne, s'est longtemps voulu une physique des grandeurs actuelles. Mais à leur corps défendant les physiciens ont été amenés à réintroduire des grandeurs potentielles* et à les considérer au même titre que les grandeurs actuelles. (Cf. Aristotélisme*).

Le non-actuel présente trois aspects :

Le virtuel* qui est le non actuel considéré en lui-même, du point de vue de son état négatif, sans en envisager le rapport à l'actuel. Le virtuel est une catégorie plus large que l'imaginaire*.

Le possible*, le non actuel dans son rapport à l'actuel. La potentialité ou la puissance*.

Le probable*, de nature épistémique . Une qualification de nos connaissances. Un degré de notre attente de l'actuel.

ACUPUNCTURE

ADAPTATION

Changement de l'état d'un système pour répondre aux modifications de l'environnement. Ceci suppose entre le système et son environnement un lien qui s'avère souvent non linéaire*.

ADIABATIQUE (PROCESSUS)

Processus thermodynamique* se produisant dans un système, sans échange de chaleur avec le milieu environnant. On dit alors que le système est adiabatiquement isolé et que ses états ne peuvent être modifiés que par une variation des paramètres externes. Le concept d'isolation adiabatique est une idéalisation d'un récipient caloriquement isolé comme une bouteille thermos. La variation de la température extérieure n'a pas d'influence sur un système adiabatiquement isolé, dont l'énergie ne peut varier que par du travail* à l'intérieur du système ou par un travail extérieur sur le système.

ADIABATIQUE (INVARIANCE).

D'une manière générale, les invariants adiabatiques sont des quantités physiques qui restent pratiquement inchangées lors d'une modification lente (adiabatique) des conditions où se trouve le système ou des paramètres dont il dépend. C'est là une manifestation de stabilité remarquable qui est amenée fatalement à jouer un rôle en physique.

En mécanique classique l'action* est un invariant adiabatique.

Pour un oscillateur harmonique, le rapport de l'énergie à la fréquence, qui a la dimension d'une action, est un invariant adiabatique. Faut il s'étonner de voir « mystérieusement » en physique quantique* le rapport de l'énergie à la fréquence être une constante fondamentale, la constante de Planck* ?

Historiquement les invariants adiabatiques ont joué un rôle important dans la théorie quantique de Bohr*-Sommerfeld, où la quantification* concernait les invariants adiabatiques. En mécanique quantique* la quantification* se présente différemment, mais cependant pour l'oscillateur harmonique quantique* c'est le rapport

de l'énergie à la fréquence qui se trouve quantifié en unités de la constante de Planck.

L'intérêt pour les invariants adiabatiques s'est accru en mécanique quantique*. Le nombre quantique* principal n s'avère un invariant adiabatique lorsque la fréquence de transition entre niveaux quantiques correspondant est beaucoup plus grande que la vitesse de modification du système. Ceci signifie que le système n'effectue pas de sauts quantique entre niveaux d'énergie et reste dans le même état quoique celui-ci se modifie tout au long de l'action extérieure lente. Ainsi lorsque l'opérateur hamiltonien* change suffisamment lentement, un état propre se transforme en un état propre de l'opérateur hamiltonien final. Les états* quantiques stationnaires sont ainsi eux-mêmes des invariants adiabatiques, ce qui traduit bien leur stabilité. Les états quantiques sont robustes. Les transitions d'un état à un autre sont des transitions non adiabatiques. Ces sauts quantiques correspondent à un profond changement de configuration du système.

Louis de Broglie dans ses idées sur le rapprochement entre mécanique et thermodynamique attribuait une grande importance à l'invariance adiabatique et aimait à rapprocher l'action* et l'entropie*, toutes deux invariants adiabatiques et invariants relativistes.

ADN

L'acide deoxyribonucléique, ADN, se présente comme une double hélice, qui a été une des icônes du XX^e siècle. La découverte de cette structure en révélant un phénomène essentiel de la duplication cellulaire a ouvert la voie au développement d'une branche nouvelle de la biologie, la biologie moléculaire*, à la jonction de la biochimie* et de la génétique*.

Les deux brins de l'hélice sont enroulés autour d'un même axe et sont tenus ensemble par des liaisons faibles, des liaisons hydrogène*. Chaque brin est constitué par une succession de quatre molécules différentes, les nucléotides*, reliées entre elles pour former une longue chaîne. Un nucléotide est constitué par une molécule de sucre, un groupe phosphate et une base azotée. C'est la nature de la base qui fait la différence entre les nucléotides. Les quatre nucléotides sont constitués de thymine (T), d'adénine (A), de guanine (G), ou de cytosine (C). Les liaisons faibles entre les deux chaînes de nucléotides proviennent de l'établissement de liaisons hydrogène* entre bases respectives. A est toujours associé à T, et C à G. Les deux chaînes sont

donc complémentaires ; la séquence des nucléotides sur l'une entraîne la connaissance de la séquence sur l'autre.

Par un ensemble d'étapes fort complexes, l'ADN code la synthèse des protéines. Le code génétique* consiste en une correspondance entre des triplets de bases et les acides aminés* constituant une protéine. Pris ainsi schématiquement l'ADN est le héros de la génomique*.

Mais il apparaît qu'une fraction importante de l'ADN ne participe pas directement à ce jeu génétique simplifié.. Certaines de ces séquences non transcrites ont certainement une fonction dans la régulation de l'activité du gène*. Chaque gène n'est pas actif en même temps dans chaque cellule. C'est la raison pour laquelle les cellules peuvent être différentes tout en possédant exactement les mêmes gènes. Les cellules sont sensibles à des conditions internes et externes activant ou désactivant tel ou tel gène lorsque le besoin s'en fait sentir, et l'ADN non transcrite prend part au système de régulation qui détermine quelle séquence est transcrite.

AGENT

AGNOSTICISME

L'agnosticisme c'est le refus de ne rien connaître qui ne soit bien établi. L'agnosticisme religieux c'est le refus de croire en un Dieu dont l'existence ne soit pas prouvée. L'agnosticisme scientifique c'est le refus de croire à une réalité qui ne soit pas expérimentalement ou rationnellement établie. L'agnosticisme de l'interprétation de Copenhague* de la M.Q. consiste à refuser toute autre réalité que celle décrite par cette théorie.

AHARONOV-BOHM (EFFET)

Effet quantique, caractérisant l'influence d'un champ électromagnétique extérieur, sur les états quantiques d'une particule chargée qui ne peut pénétrer dans la zone où se trouve concentré le champ. L'existence d'un tel effet non local* pour l'interaction du champ électromagnétique et de la particule chargée, souligne que cette interaction ne se réduit pas à l'action locale de la force de Lorentz* sur la particule.

Tout ceci souligne le caractère de calcul probabiliste de la M.Q. Ce n'est pas une mécanique mais un calcul des probabilités. En tant

que tel il doit dépendre des potentia*, donc des énergies potentielles et des potentiels*. C'est bien ce que proclame l'équation de Schrodinger, équation fondamentale de ce calcul des probabilités. La présence d'un potentiel modifie la phase de la fonction d'onde* et agit donc en principe sur des figures d'interférence. L'observation de l'effet Aharonov-Bohm est donc une expérience cruciale, confirmant le bien fondé de la démarche probabiliste de la M.Q..

ААРОНОВА - БОМА ЭФФЕКТ - квантовомеханический эффект, характеризующий влияние внешнего электромагнитного поля, сосредоточенного в области, недоступной для заряженной частицы, на её квантовое состояние. Наличие такого нелокального воздействия электромагнитного поля на заряженную частицу, исчезающего в классическом пределе, подчёркивает, что при квантовом рассмотрении взаимодействие заряженной частицы с электромагнитным полем не сводится к локальному действию на неё силы Лоренца. Впервые на возможность такого эффекта указали У. Эренберг (W. Ehrenberg) и Р. Э. Сайди (R. E. Siday) в 1949. Независимо подробное теоретическое изучение эффекта проведено в 1959 Я. Аароновым и Д. Бомом, отметившими его тесную связь с фундаментальными положениями квантовой теории. Их исследования привлекли внимание к особой роли электромагнитных потенциалов в квантовой теории.

Теоретические основы Ааронова - Бома эффекта

Возможность Ааронова - Бома эффекта формально обусловлена тем, что уравнение Шрёдингера для волновой функции заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле содержит потенциал этого поля. Он определяет фазу [волновой функции](#) и при выборе подходящей геометрии опыта приводит к наблюдаемому интерференционному эффекту даже при отсутствии прямого силового воздействия поля на частицу. Этот эффект не зависит от выбора калибровки потенциалов и обусловлен разницей фаз вдоль различных возможных путей распространения частицы. Он существует как для скалярного, так и для векторного потенциала электромагнитного поля.

Эффект Ааронова — Бома важен в философском смысле.

Классическая физика основана на уравнении Ньютона $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$; в течение столетий физика была основана на понятии силы, и напряженность электрического поля \mathbf{E} , так же как и вектор магнитной индукции \mathbf{B} - по сути "силовые характеристики" электромагнитного поля: их можно использовать для наиболее прямого и непосредственного вычисления силы, действующей на заряженную частицу (в сущности, скажем, \mathbf{E} - и есть просто сила, действующая на единичный неподвижный заряд).

В рамках [специальной теории относительности](#) эта концепция не претерпела радикальных изменений, хотя и чуть утратила свою первоначальную несомненность. Дело в том, что сила из уравнения Ньютона не является [4-вектором](#), отчего в данной теории расчеты и формулировки с использованием

понятия силы несколько теряют первоначальную ньютоновскую простоту и красоту (а поэтому закрадываются некоторые сомнения в их фундаментальности). (**E** и **B** также не являются 4-векторами, однако это не приводит к полной замене представлений об электромагнитном поле, т. к. для них находится достаточно прямое и красивое 4-мерное обобщение — [тензор электромагнитного поля](#) (компоненты **E** и **B** оказываются его компонентами), во многом позволяющий записать уравнения электродинамики даже более компактно и красиво, чем **E** и **B** по отдельности, при этом оставаясь по смыслу всё той же напряженностью поля).

В квантовой же механике с самого начала возникают определенные вопросы с силовой формулировкой физики.

В квантовой механике частица представлена как волна (а значит вообще говоря не локализована в точке пространства или даже в малой окрестности точки), поэтому принципиально оказывается довольно трудно описать ее взаимодействие с чем-либо (например, с электромагнитным полем) в терминах силы (ведь классическое понятие силы или силового поля подразумевает, что воздействие на частицу - которая в классике точечна - происходит тоже в одной точке пространства; а естественно обобщить этот подход на квантовый случай делокализованной частицы оказывается не просто). Поэтому в квантовой механике предпочитают иметь дело с потенциальной энергией и потенциалами. В релятивистской квантовой механике, включая квантовую электродинамику, трудно вообще говорить о понятии силы.

При формулировке электродинамики, теория в принципе может выбрать за основные величины напряженности **E** и **B**, или [потенциалы](#) ϕ и **A**. Вместе ϕ и **A** образуют 4-вектор (ϕ - нулевая компонента, **A** - три остальные компоненты) - электромагнитный потенциал ([4-потенциал](#)). Хотя он и не является однозначно определенным, поскольку к этому 4-вектору всегда можно добавить некоторую 4-векторную добавку (так называемое *калибровочное преобразование*), и при этом поля **E** и **B** не изменяются (одно из проявлений [калибровочной инвариантности](#)). Долгое время физики задавались вопросом, фундаментально ли поле электромагнитного потенциала, даже если оно не может быть определено единственным образом, или его появление в теории - это только удобный формальный математический трюк.

Эффект Ааронова — Бома показывает что мы можем менять электромагнитный потенциал менять непосредственно измеримые величины (такие, как положение интерференционных полос на фотопластинке), пропуская электрон через области пространства, где поля **E** и **B** вообще отсутствуют (имеют нулевые значения), но электромагнитный потенциал отличен от нуля: изменения электромагнитного потенциала меняют непосредственно наблюдаемую картину, хотя **E** и **B** не меняются в тех областях пространства, которые доступны частице, и в которых таким образом им можно было бы приписать локальное физическое воздействие на нее.

Таким образом, эффект Ааронова — Бома подтверждает точку зрения, что понятие силы с современной точки зрения не самое подходящее при формулировке законов физики, и гораздо лучше получается использовать понятие потенциалов (и энергии взаимодействия) вместо сил. Это может быть аргументом в пользу более фундаментального характера потенциалов по сравнению с напряженностями полей, что (помимо чисто формальных соображений, которые

часто всё же оказываются практически важнее) представляет интерес для формулировки [квантовых теорий поля](#).

ALCHIMIE

L'Hermétisme* et l'Alchimie sont comme des conservatoires de grandes idées forces sur le monde, des lieux privilégiés d'intuitions fondamentales en perpétuelle recherche d'explicitation. L'idée d'Unité* est de celles là. Avant tout unité profonde entre la spiritualité, la philosophie et la science. Difficile démarche dans un monde où tout concourt à les séparer.

L'Hermétisme et l'Alchimie contiennent à l'évidence une sagesse profonde, lentement accumulée, sur le mouvement*, les transformations et le temps*. Rien d'étonnant à l'intérêt passionné de Newton* pour l'alchimie. Que les théories thermodynamiques* et dynamiques des quarante dernières années réalisent certains idéaux alchimiques ne peut en soi constituer une surprise si l'on considère les ressorts profonds de l'alchimie. Elle véhicule en particulier une conception aristotélicienne du monde opposée à la conception platonicienne. Une conception où le mouvement et la matière se conjuguent pour créer les formes, alors que pour le platonisme les formes sont données à priori.

En dehors du contexte symbolique et métaphorique, les recherches alchimiques bénéficièrent certainement dans notre civilisation, de l'influence considérable qu'exerça dès la fin du XIIème siècle, la pensée d'Aristote qui triompha du platonisme. Les vues de ce philosophe sur la constitution de la matière forment presque toute la trame de l'alchimie ésotérique. La science moderne qui voudrait être vue comme une démarche expérimentale, et en cela serait profondément aristotélicienne, est en réalité porteuse d'un idéal mathématique tout à fait platonicien. Elle est en accord avec l'esprit néo-platonicien de l'époque de la « Renaissance » qui l'a vue naître. C'est la raison fondamentale pour laquelle la gnose hermético-alchimique, viscéralement aristotélicienne dans sa vision du monde, s'est trouvée marginalisée. Ce qui en a subsisté s'est maintenu avec plus ou moins de fortune comme réservoir d'une autre conception du monde.

La chimie du XIXème siècle (et en grande partie celle du XXème) n'est pas issue de l'alchimie, tout comme la physique moderne n'est pas issue de la physique aristotélicienne. Ce sont des doctrines de la régularité, de l'ordre, de la simplicité qui s'incarnent dans le langage quantitatif des mathématiques.

La physique aristotélicienne s'est constituée contre Platon par une ontologisation du devenir, tandis que la naissance de la science moderne s'est réalisée au contraire par une désontologisation du devenir.

L'Hermétisme et l'Alchimie sont des doctrines de l'irrégularité, du désordre, de la complexité. Visions du mouvement, de la transformation, de la métamorphose, de la transfiguration, de l'incarnation, de la réincarnation, de la genèse, de la renaissance, de la révélation-occultation, du polymorphisme (d'Hermès), de la décadence et du progrès, du temps, de la mort.

L'alchimie a une double nature, extérieure ou exotérique, et secrète ou ésotérique*.

L'alchimie exotérique se fixe pour but la préparation d'une substance, la Pierre Philosophale ou Grand Œuvre, dotée du pouvoir de transmuter les métaux vils (plomb, étain, fer, cuivre et mercure) en métaux précieux, or et argent.. La Pierre était parfois appelée Elixir ou Teinture, et on lui attribuait outre le pouvoir de transmutation, celui de prolonger indéfiniment la vie humaine.

La croyance que l'Elixir ne pouvait être obtenu sans la grâce, sans la faveur divine, contribua au développement de l'alchimie ésotérique*, ou mystique, qui évolua peu à peu vers un système où la métamorphose physique des métaux n'était plus qu'un symbole*, symbole du pêcheur qui par la prière et la soumission à la volonté de Dieu, accède à la sainteté. De la purification des métaux à la purification de l'âme.

Ces deux aspects de l'alchimie sont souvent inextricablement mêlés.

On doit prendre conscience qu'au Moyen Age c'étaient les mêmes hommes ou leurs disciples qui distillaient des remèdes, des couleurs, des vernis, exprimaient des idéaux de purification et de sublimation, et qui rédigeaient de célèbres traités de logique et de théologie scolastiques.

Dans « Histoire de la Chimie », B. Bensaude-Vincent et I. Stengers soulignent que les enjeux intellectuels, politiques et théologiques de la doctrine alchimique, qui met en scène les relations entre les pouvoirs humains, les devenirs de la matière et les secrets de la création et du salut, gagnèrent sans doute une nouvelle intensité dans le monde chrétien. Car l'alchimie allait s'inscrire dans un monde en crise, où le développement des centres urbains et des activités intellectuelles, commerciales et artisanales, déstabilisait les distinctions

entre savoirs païens et savoirs révélés, entre la recherche du salut et les pratiques productives, entre foi et raison.

Tout se passe comme si des problèmes techniques et économiques apparaissaient en filigrane derrière des luttes philosophiques et théologiques restées célèbres, en particulier la Querelle des Universaux et celle de la Pauvreté.

Charles Morazé souligne dans « Les origines sacrées des sciences modernes », le rôle joué dans l'invention des nouveaux enjeux de l'alchimie par les ordres mineurs nouvellement créés, dominicains et surtout franciscains.

Les dominicains Albert le Grand, Vincent de Beauvais et Thomas d'Aquin* écrivent sur l'alchimie (Thomas tient la transmutation pour une vérité démontrée). Quant aux préoccupations alchimiques des franciscains Roger Bacon et Arnaud de Villeneuve, comme aussi de Raymond Lulle*, mystique proche des franciscains, elles ne peuvent être séparées des questions théologiques (divin présent dans le moindre être de la nature), politiques (dignité des pauvres et du travail manuel), logiques (nominalisme anti-aristotélicien), pratiques (purification, macération, rectification) qui toutes traduisent une mise en question de l'opposition entre les préoccupations d'ici bas et l'ordre du salut.

La distillation* reste au cœur de l'alchimie, tout en se heurtant à des interdictions diverses. Les grands traités distillatoires du XIV^e siècle émaneront des Franciscains ou de leurs disciples, se réclamant à leur suite, de l'augustinisme. C'est la distillation qui a procuré à l'alchimie son langage, à l'exclusion des autres techniques. Les appareils mêmes du distillateur, ses alambics, filtres, retortes, congés, Pélicans, Bains-Marie alimentent l'essentiel de son iconographie. La purification, la sublimation, le rejet des impuretés sont les buts communs de tous les alchimistes. C'est à un franciscain, Vital du Four, que l'on doit la première description de la rectification de l'alcool, donc la fabrication de l'alcool de l'alcool. Dans les traités de distillation sont examinées les possibilités abstraites de processus ternaires, tels que la distillation ou la métallurgie liquide, ce qui est en opposition avec le système du monde des idéalistes grecs, et spécialement Aristote, qui n'admettait de médiation* ni entre les éléments*, ni entre les qualités*.

A travers toutes ses démarches, l'Alchimie se veut le champ d'expression d'un des ressorts les plus profonds de la nature, le jeu des couples dynamiques antagonistes.

Deux de ces couples sont, le couple Révélation-Occultation et le couple Dissociation-Unification.

L'Alchimie est comme la conscience traditionnelle de l'enjeu d'une dualité fondamentale au sein de l'Unité, qu'elle exprime par le précepte Solve et Coagula (expansion-contraction). Une idée qui domine aussi la kabbale* lourianique, avec la contraction du Divin pour laisser place au monde.

L'Alchimie se veut une sagesse dialectique*, dans une pensée qui tente d'être doublement opératoire au plan de la matière comme au plan de l'esprit. Opérative et spéculative. Connaissance des rapports entre le saisissable et l'insaisissable.

Le langage alchimique est de ce point de vue une étonnante tentative verbale pour dire comment l'on rassemble en dispersant, l'on disperse en rassemblant.

« ...effort sans cesse réitéré pour éviter de prendre le monde dans les filets du langage comme le font les modernes sémiotiques ; pour éviter aussi de perdre le monde dans une Unité restée étrangère à ses manifestations phénoménales comme le risquèrent toutes les grandes métaphysiques.

....développement de la fameuse formule Solve et Coagula : l'œuvre étant corporification de l'esprit et spiritualisation des corps »

Françoise Bonnardel

« La solution du corps et la coagulation sont deux choses, mais elles sont une seule opération. Car l'esprit n'est pas coagulé si ce n'est au moyen de la solution du corps. Et le corps n'est pas dissous, si ce n'est au moyen de la coagulation de l'esprit ; et quand le corps et l'âme s'unissent chacun d'eux agit sur son semblable.

Exemple : quand l'eau est unie à la terre, l'eau s'efforce de dissoudre la terre grâce à son humidité et à sa vertu. Elle la rend en effet plus subtile qu'elle n'était, et la rend semblable à elle même, car l'eau est plus subtile que la terre. L'âme agit de même dans le corps. Et de la même manière l'eau est épaissie au moyen de la terre, et elle devient semblable à de la terre rendue dense, car la terre est plus épaisse que l'eau.

C'est pourquoi il n'y a pas de différence entre la solution du corps et la coagulation de l'esprit, et ce n'est pas un ouvrage différent en quelque point, de telle sorte que l'un se fasse sans

l'autre, de même qu'il n'y a pas de parie différente de temps entre la terre et l'eau lors de leur conjonction, de manière que l'une soit séparée et distinguée de l'autre dans leurs opérations. »

Le Rosaire des Philosophes

Dans « La Grande Triade » (Chap. VI) René Guénon* précise le sens de Solve et Coagula :

« ...la formule solve et coagula est regardée comme contenant d'une certaine façon tout le secret du « Grand Œuvre »...

le terme solve est parfois représenté par un signe qui montre le Ciel et le terme coagula par un signe qui montre la Terre ; c'est à dire qu'ils s'assimilent aux actions du courant ascendant et du courant descendant de la force cosmique, ou en d'autres termes aux actions respectives du yang et du yin.

Toute force d'expansion est yang, et toute force de contraction est yin.

.....ce qui est « condensation » sous le rapport de la substance est au contraire une « dissipation » sous le rapport de l'essence, et, inversement, ce qui est « dissipation » sous le rapport de la substance est une « condensation » sous le rapport de l'essence ; par suite, toute « transmutation » au sens hermétique de ce terme, consistera proprement à « dissoudre » ce qui était « coagulé », et simultanément à « coaguler » ce qui était dissous, ces deux opérations apparemment inverses n'étant en réalité que les deux aspects complémentaires d'une seule et même opération.

C'est pourquoi les alchimistes disent fréquemment que la « dissolution du corps est la fixation de l'esprit » et inversement, esprit et corps n'étant en somme pas autre chose que l'aspect « essentiel » et l'aspect « substantiel » de l'être »

...

Ainsi « Solve et Coagula » représente au sein de l'Alchimie une grande idée force sur le monde. L'idée qu'à l'expansion s'oppose la contraction, sans que la séparation entre ces deux mouvements soit toujours possible, ni même souhaitable. En fait c'est certainement la conjonction de ces deux dynamiques qui est le plus souvent à l'œuvre,

conjonction paradoxale qui s'accomplit en général par la voie d'un médiateur. Idée qui va être relayée par la pensée romantique allemande.

« Le Grand Œuvre c'est la fusion du soufre et du mercure assimilée à l'acte d'accouplement sacré du Roi et de la Reine

Il y a pour les alchimistes trois principes constitutifs de la matière ; tout, élément, tout corps réel sont composés de ces trois substances.

Le Soufre, masculin, actif, chaud, fixe, qui brûle, fermente et représente la Foi, la Sagesse, l'Esprit, Dieu.

Le Mercure, féminin, passif, froid, volatil, qui s'évapore, coagule et signifie Espérance, Intelligence, Ame, Univers Astral.

Le Sel (Arsenic) incombustible, qui lie le soufre et le mercure, représente un moyen terme, un médium en mouvement et symbolise la charité, le corps et l'univers matériel.

Le soufre et le mercure représentent les propriétés contraires de la matière, mais le sel est le catalyseur qui les unit.

....Tout s'opère dans l'univers par action et par contraction.

Toutes les choses créées sont régies par des flux et des reflux.

On trouve toute cette thématique illustrée chez un auteur allemand du XVIII^{ème} siècle, qui fait partie de ce contexte d'intense fermentation spirituelle à partir duquel s'épanouit le romantisme allemand : Karl von Eckartshausen (1752-1803).

Selon Eckartshausen, toute action suppose une action contraire. Le temps est une force agissante, l'espace une résistance : la forme dépend de ces deux actions opposées. La force extensive est semblable au mouvement perpendiculaire ; la force contractive au mouvement horizontal.

La grande loi est l'émanation suivie du retour à l'énergie primordiale. Sans la force expansive, fondement du mouvement, il n'y aurait pas de force attractive. Tout s'assemble et se défait, nous sommes en état de séparation : notre destination est le retour à l'Unité.

L'électricité symbolise bien la loi des contraires par son pôle positif et son pôle négatif. On peut dire que la force contractive, attire la nature, assemble de la matière, tandis que la force extensive fractionne cette matière, fait disparaître ses composants pour la conduire au simple en l'homogénéisant.

Le ciel et la terre sont extensum et concretum. Le monde inspire et expire comme un être humain. Toutes les passions humaines ont été classées par un médecin anglais, William Falconer, sous les deux rubriques, expansion et contraction. La joie, l'amour, l'espoir font partie de la première catégorie. La colère, le désespoir, la tristesse, l'avarice, la

jalousie, font partie de la seconde. Eckartshausen adopte cette conception. Psychologie, alchimie et théosophie ont une longue tradition commune bien avant Jung.*

A. Faivre

On pourrait analyser dans sa formulation contemporaine quelques aspects de cette thématique, pour en préciser les figures. Au demeurant on va retrouver là au plan technique des problèmes fondamentaux de la science et de la philosophie, que l'alchimie se borne à exprimer à sa manière dans le contexte spéculatif qui est le sien.

Ne nous étonnons pas de voir utiliser un langage alchimique dans un livre de physique comme celui de J. Tillieux, « Leçons élémentaires de physique expérimentale selon les théories modernes », publié dans les années 20 de ce siècle, où le monde physique, à vrai dire l'univers tout entier se partage en deux catégories : le pondérable et l'impondérable.

Quant aux expériences cognitives les plus élémentaires qui cherchent à dépasser l'objet pour mieux le préciser, elles relèvent bien évidemment de Solve et Coagula. Car tout fait ou tout objet donné, perçu ou construit est d'emblée plongé dans un ensemble plus vaste qui le dépasse et le transcende. Un mouvement incessant de l'existence à l'être, de la substance à l'essence, et vice-versa.

L'alchimie s'est heurtée à un certain nombre de difficultés logiques et techniques. Les éléments physiques étaient aussi des contraires logiques. C'est la logique d'Aristote qui est remise en cause dès qu'il s'agit d'affinité, d'union, de coïncidence des contraires, de cures spécifiques et des combinaisons irréversibles et permanentes. La recherche d'un médiateur* s'imposait pour unir les deux mondes, celui des oppositions et celui de la pure substance du ciel à savoir la cinquième essence ou Quintessence*. Mais comment atteindre la substance céleste sinon par sublimations successives ? Car les quatre éléments sont indissolublement unis par le lien impérissable de la Quintessence et forment la Pierre. La substance céleste est parfaite. Pour un alchimiste, réaliser un corps amélioré par rapport aux corps naturels postulera donc le recours à la seule substance qui leur soit

supérieure dans l'univers. L'éther achève sa transformation de réalité physique en recours logique. La Quintessence va s'affirmer.

Selon Jean de Roquetaillade, un mystique proche des franciscains, il est possible de soustraire l'homme à la corruption grâce à l'usage de la quintessence, « contre-partie terrestre de la matière céleste ».

La quintessence se prépare à partir de l'*aqua ardens* (alcool), mille et mille fois distillée jusqu'à être entièrement débarrassée des quatre éléments. La quintessence ainsi obtenue étant de nature incorruptible, elle est à même d'agir sur les quatre qualités élémentaires régissant le corps humain afin de le préserver de la corruption. Cette action se réalise par le biais de l'or, soleil terrestre, de même que les cieux agissent sur le monde par le biais du soleil et des astres. L'or ne doit pas être d'origine alchimique, car aux yeux de Roquetaillade, l'or alchimique est fait de matières corrosives. Il faut donc employer de l'or naturel, le purifier, le chauffer et le distiller plusieurs fois avec de l'*aqua ardens* qui en extraira toutes les propriétés. Puis cette "eau ardente aurifiée" doit être ajoutée à la quintessence pour produire la médecine universelle. Cette opération, Roquetaillade la désigne comme l'action de fixer le soleil [*i.e.* l'or] dans le ciel [*i.e.* la quintessence].

C'est l'aboutissement nécessaire de la théorie de la Quintessence : la simplicité de l'éther commence à envahir le monde terrestre, car elle s'avère, en définitive, une structure logique enveloppant les vapeurs subtiles du soufre, du mercure et des hydrocarbures. C'est à la périphérie des deux mondes, sublunaire et supralunaire, que se tenait le Dieu-acteur impassible. Et c'est lui qui devient ce médiateur caché qui s'exprime en terme de Quintessence terrestre.

La notion de quintessence répond à quatre besoins logiques principaux du XIII^e au XIV^e siècle : offrir une base stable sous le changement, rendre compte de cette efficacité cachée dont les Esprits distillés, supérieurs aux autres essences, donnent l'exemple, véhiculer les rudiments d'une science qui déjà voudrait être universelle et, enfin, justifier la certitude tirée de l'expérience. Le pseudo-Raymond Lulle*, Roger Bacon* et Arnaud de Villeneuve* ont faits les beaux jours de la Quintessence.

L'alchimie est une catégorie de la culture médiévale qui a fait l'objet de longues survivances. Elle joue un rôle essentiel dans la culture de grands savants fondateurs de la science moderne, Newton* et Leibniz*. Elle réapparaît de manière inattendue dans l'œuvre du psychanalyste C.G. Jung*.

Les recherches de Jung ne doivent rien à l'intérêt pour l'histoire de la chimie, une histoire écrite par le grand chimiste Marcellin Berthelot*, ni à l'attraction pour le symbolisme hermétique lui-même. Médecin et analyste il étudiait le comportement de la psyché dans un but thérapeutique. Il a été frappé par l'analogie entre le symbolisme des rêves et des hallucinations de certains de ses patients et le symbolisme alchimique. A la même époque, Jung se plonge dans d'anciens manuscrits alchimiques. Il est très vite frappé par l'analogie entre leur quête de transformation de la matière et cette notion de transformation qu'il constate à l'œuvre dans l'inconscient.

« Cette curieuse faculté de métamorphose dont fait preuve l'âme humaine, et qui s'exprime précisément dans la fonction transcendante, est l'objet essentiel de la philosophie alchimique de la fin du Moyen-Age », écrit-il. "Elle exprime son thème principal de la métamorphose grâce à la symbolique alchimique. Il nous apparaît aujourd'hui avec évidence que ce serait une impardonnable erreur de ne voir dans le courant de pensée alchimique que des opérations de cornues et de fourneaux. Certes, l'alchimie a aussi ce côté, et c'est dans cet aspect qu'elle constitua les débuts tâtonnants de la chimie exacte. Mais l'alchimie a aussi un côté vie de l'esprit qu'il faut se garder de sous-estimer, un côté psychologique dont on est loin d'avoir tiré tout ce que l'on peut tirer : il existait une "philosophie alchimique", précurseur titubant de la psychologie la plus moderne. Le secret de cette philosophie alchimique, et sa clé ignorée pendant des siècles, c'est précisément le fait, l'existence de la fonction transcendante, de la métamorphose de la personnalité, grâce au mélange et à la synthèse de ses facteurs nobles et de ses constituants grossiers, de l'alliage des fonctions différenciées et de celles qui ne le sont pas, en bref, des épousailles, dans l'être, de son conscient et de son inconscient."

ALEATOIRE

D'une manière générale signifie l'intervention du hasard*. Mais si l'on considère les différentes caractérisations du hasard*, le terme aléatoire, par opposition à celui de pseudo-aléatoire* ou de quasi-aléatoire*, désigne l'ensemble des phénomènes liés au hasard c.a.d. celui que n'engendre aucun mécanisme ou ne décrit aucun formalisme, celui où la taille des données est égale à la complexité de Kolmogorov, ou complexité aléatoire*. En fait le pseudo aléatoire est une catégorie de l'aléatoire que l'on peut distinguer en l'opposant au « hasard pur ». Affirmer que le hasard pur existe c'est adopter une position ontologique qui affirme qu'il y a des phénomènes naturels que nous ne pourrions jamais décrire, donc jamais comprendre. Les autres emplois

du terme hasard n'impliquent en général que des propriétés statistiques*, suffisantes pour l'emploi du calcul des probabilités*.

ALEATOIRE (EVENEMENT)

Evènement se produisant au hasard*. Résultat d'une épreuve (expérience aléatoire), définie par les conditions de l'expérience (Catégorie d'épreuves). On parle d'une éventualité du hasard. Un jet de dé. Le tirage d'une boule blanche ou noire d'une urne.

L'étude des systèmes complexes* s'accompagne souvent d'une interrogation sur la nature, déterministe ou stochastique, des mécanismes à l'œuvre. Cette interrogation n'est pertinente que si elle porte sur les modèles* élaborés pour décrire le système réel; la réponse dépend alors de façon cruciale de l'échelle* à laquelle on se place. Il est ainsi possible d'introduire des modèles déterministes et des modèles stochastiques pour décrire un phénomène, et de relier leurs variables et paramètres respectifs. On doit souligner l'importance de dégager les différentes échelles caractéristiques d'un phénomène.

Ainsi dans un jet de dés les conditions de l'expérience sont définies « grossièrement » ce qui s'accompagne d'un évènement aléatoire. Si les conditions étaient définies avec une précision « microscopique » nous savons aujourd'hui que le comportement serait parfaitement déterministe mais chaotique (chaos déterministe*), ce qui permet de comprendre le hasard grossier, comme une sensibilité aux conditions initiales. Dans un jeu de pile ou face, une condition initiale suffisamment précise conduit à un résultat défini, mais au voisinage immédiat de toute condition impliquant pile se trouve une condition impliquant face. Si le chaos déterministe n'existait pas le système n'aurait pas un comportement capricieux lorsque les conditions initiales sont définies avec peu de précision.

Que dire si l'on s'avisait de regarder le système à l'échelle microphysique (quantique*) ???

La nature des choses passe à travers les mailles du filet de la connaissance !

ALEATOIRE (GRANDEUR) (Variable aléatoire)

Grandeur attachée à un évènement aléatoire*, variable avec chaque réalisation de l'évènement. Grandeur numérique apparaissant

à chaque jet du dé. Une variable aléatoire est caractérisée par l'ensemble des valeurs qu'elle peut prendre et par la probabilité* de ces valeurs. C'est un ensemble de nombres auxquels sont attachées des probabilités. On parle de la loi de probabilité d'une variable aléatoire.

ALEATOIRE (FONCTION) (Cf. Fonction aléatoire)

ALEATOIRE (PSEUDO. Cf. Pseudo-aléatoire)

ALEATOIRE (QUASI. Cf. Quasi-aléatoire)

ALEATOIRE ou STOCHASTIQUE (PROCESSUS ou PHENOMENE)

Grandeur aléatoire qui varie au cours du temps. Un processus aléatoire est en fait l'objet mathématique constitué par l'ensemble des évolutions temporelles d'une grandeur aléatoire dans ses divers échantillons expérimentaux. C'est une fonction aléatoire* du temps. Toutes les trajectoires possibles d'une particule dans le mouvement brownien constituent les réalisations particulières d'un processus aléatoire. La loi de l'évolution temporelle est donnée sous une forme probabiliste par la fonction d'auto corrélation* temporelle des lois de composition

Les processus aléatoires les plus courants dont la théorie est largement développée sont les processus aléatoires stationnaires* et les processus markoviens*.

ALGEBRE

Partie des mathématiques parmi les plus anciennes comme l'arithmétique* et la géométrie*.

Science des systèmes d'objets quelconques pour lesquels se trouvent définies des opérations semblables à celle de l'addition et de la multiplication en arithmétique. Ces opérations, dites opérations algébriques, sont des lois de composition interne*, permettent de définir sur les ensembles d'objets qu'elles concernent des structures d'algèbre. Les méthodes de l'algèbre s'appliquent aux problèmes de la résolution d'équations*.

L'algèbre s'avère une généralisation de l'arithmétique à des objets plus complexes que les nombres réels, comme les nombres complexes*, les vecteurs* ou les opérateurs*.

Les opérations de la logique* portant sur les propositions peuvent être considérées comme des opérations algébriques. C'est cette démarche qui a transformé la logique mathématique*.

La théorie des groupes* est une des disciplines algébriques les plus fertiles de la science contemporaine.

La physique linéaire* emploie massivement pour sa formulation le langage de l'espace vectoriel* à la base de l'algèbre linéaire*.

ALGÈBRE ABSTRAITE

ALGÈBRE DE BOOLE

Les opérations élémentaires sur les ensembles sont dans un ensemble d'ensembles des lois de composition interne. Les trois opérations : réunion, intersection, complémentarité munissent cet ensemble d'une structure* d'algèbre* dite algèbre de Boole.

La réunion et l'intersection sont distributives l'une par rapport à l'autre et présentent une analogie formelle totale. La réunion d'un ensemble A et de l'intersection des ensembles B et C est l'intersection de l'ensemble D, réunion de A et B, et de l'ensemble E, réunion de A et C. La même chose en remplaçant réunion par intersection et intersection par réunion.

ALGÈBRE LINÉAIRE

Partie importante de la mathématique générale étudiant les espaces vectoriels* et les espaces associés ainsi que les opérateurs* linéaires sur ces espaces. Elle dévoile la structure de ceux-ci par la recherche des vecteurs propres* et des valeurs propres*. Un vecteur propre est un vecteur sur lequel l'action d'un opérateur se réduit à la multiplication de cet opérateur par un nombre. Ce nombre est réel seulement pour une catégorie d'opérateurs qui jouent un rôle important en physique mathématique*. La recherche des vecteurs propres (en général des fonctions) et des valeurs propres est au cœur de toute la physique mathématique car elle définit les modes propres* du mouvement. C'est ce que fait aussi la mécanique quantique qui se coule dans le moule de l'algèbre linéaire au point de s'y identifier pour son formalisme.

La théorie des groupes* fait aussi massivement appel à l'algèbre linéaire. L'algèbre linéaire est un langage universel pour toute la physique mathématique.

Les mathématiciens russes Kostrikin et Manin écrivent :

« D'un point de vue plus général, le contenu de l'algèbre linéaire est le langage mathématique exprimant l'une des idées les plus répandues de la science de la nature – l'idée de linéarité. Le cas particulier le plus important est sans doute le principe de linéarité des petits accroissements : presque tout processus naturel est presque partout linéaire à petite échelle. Ce principe est à la base de toute l'Analyse mathématique* et de ses applications. L'algèbre vectorielle de l'espace physique tridimensionnel, pierre angulaire historique dans l'édification de l'algèbre linéaire, procède de la même source.*

Après Einstein, nous comprenons d'ailleurs que l'espace physique n'est approximativement linéaire que dans un petit voisinage de l'observateur. Heureusement ce petit voisinage est suffisamment grand.*

La physique du XX^e siècle a d'une manière brutale et inattendue élargi la sphère d'application de l'idée de linéarité, en ajoutant au principe de linéarité des petits accroissements le principe de superposition des vecteurs d'états*.*

En gros, l'espace des états de tout système quantique est un espace vectoriel* sur le champ mathématique* des nombres complexes*. Il en résulte que presque toutes les constructions de l'algèbre linéaire complexe se sont transformées en un appareil utilisé pour la formulation des lois fondamentales de la nature : de la théorie de la dualité linéaire, expliquant le principe quantique de complémentarité* de Bohr*, à la théorie de la représentation des groupes*, expliquant le tableau de Mendelév*, la « zoologie » des particules élémentaires et même la structure de l'espace-temps »*

C'est dans cette euphorie linéaire, que dans les années 60, le non linéaire* surgit et explose.

ALGORITHME

Ensemble d'instructions mathématiques enchainées les unes aux autres. Procédure permettant d'effectuer un calcul*. Tout tableau mathématique ne possède pas un algorithme permettant de le résoudre. C'est le problème de la calculabilité*.

ALLEGORIE

Substitution d'un signifiant* à un autre pour le représenter. Le buste de Marianne pour dire la République, ou l'aigle pour représenter l'Empire. C'est donc une notion proche du symbole* où c'est aussi le signifiant qui change.

ALLELE

On appelle allèles différentes formes d'un même gène. Chaque allèle se différencie par une ou plusieurs différences de la séquence des nucléotides*. Ces différences apparaissent par mutation* au cours de l'histoire de l'espèce, ou par recombinaison génétique*. Tous les allèles d'un gène occupent le même locus (emplacement) sur un même chromosome

Dans une cellule diploïde*, il y a deux allèles pour chaque gène : un allèle transmis par chaque parent. Les allèles transmis par les parents peuvent être identiques ou non, distinguant ainsi les organismes homozygotes et hétérozygotes

ALPHA (DECOMPOSITION)

Décomposition radioactive* d'un noyau avec émission de particules α . L'expulsion de cette particule hors du noyau est un exemple d'effet tunnel*.

ALPHA (PARTICULE)

La particule α est le noyau* de l'atome d'hélium composé de deux protons et de deux neutrons.

AMBIGUITE

Situation dont le sens, s'il y'en a un, n'est pas univoque. Tout discours est plus ou moins ambigu. L'ambiguïté des mathématiques est de produire des discours sans ambiguïtés. L'ambiguïté grammaticale est une amphibologie*.

AME**AME DU MONDE****AMPHIBOLOGIE**

Construction grammaticale permettant une ambiguïté entre le sujet et l'objet.

Verlaine en donne un bel exemple dans : Sous le pont Mirabeau coule la Seine, et Nos Amours, Faut il qu'il m'en souviennne.

AMPLITUDE DE PROBABILITE

Dans le calcul des probabilités la notion d'amplitude de probabilité est étrangère. Une probabilité est donnée à priori ou

obtenue à partir de celle-ci par des opérations ensemblistes. On peut aussi l'obtenir à l'aide d'un modèle physique de phénomène aléatoire*.

Le calcul des probabilités quantiques* tire ses probabilités d'une opération de prise du carré d'une fonction initiale complexe* dite amplitude de probabilités obtenue elle-même à l'intérieur d'un modèle physique. C'est la fonction d'onde* ou le vecteur d'état*. Objet étrange issu du fondement même de la mécanique quantique qui fait parfois donner à celle-ci le nom de calcul ondulatoire des probabilités. En effet tout comme dans la théorie des ondes où l'objet de base est l'onde soumise au principe de superposition mais l'observable physique est le carré de l'onde périodique (la densité d'énergie ou l'intensité de la lumière) ce qui fait apparaître les termes d'interférence, l'objet de base est une amplitude de probabilité complexe* dont le carré donne des probabilités et fait apparaître aussi des termes d'interférence*. Ceci s'illustre en disant que l'incertitude est exprimée différemment en probabilité classique et en probabilité quantique. L'incertitude classique s'exprime par un jeu de probabilités alors que l'incertitude quantique s'exprime comme une superposition de fonctions d'ondes. C'est cette superposition qui fait le problème que le chat de Schrödinger* veut soulever.

ANALOGIE

Similitude selon certains aspects, certaines qualités ou certaines relations entre des objets, des événements ou des processus non identiques. L'analogie met souvent en relation deux rapports appartenant à un domaine différent. Chaque rapport étant défini par deux termes, quatre termes sont donc en jeu. Par exemple : « la vieillesse est à la jeunesse ce que le soir est au matin »

Dans le raisonnement par analogie, la connaissance obtenue sur un objet modèle est transférée sur un autre objet moins étudié ou moins accessible à l'étude. En ce qui concerne un objet concret, les conclusions obtenues par un raisonnement analogique n'ont qu'un caractère de vraisemblance; elles peuvent être la source d'hypothèses scientifiques et d'hypothèses d'induction*, jouant ainsi un rôle important dans le développement de la science. Si les conclusions par analogie concernent des objets abstraits, elles peuvent devenir certaines lorsque l'analogie est formulée par un isomorphisme*. C'est là une méthode de simulation*.

L'analogie est un des aspects essentiels du "Comme si". C'est un des produits importants de l'imaginaire*. Elle est au cœur de la mimésis*.

Les conceptions de la Philosophie de la Nature jusqu'au Moyen-âge tardif étaient construites sur des analogies, qui remplaçaient souvent l'observation et l'expérimentation. Dans les développements ultérieurs de la science, l'analogie perd sa valeur de moyen d'explication, mais elle continue d'être largement utilisée comme instrument de formation des théories scientifiques. Ainsi Huygens* et plus tard Young* ont utilisé l'analogie entre les propriétés du son et celles de la lumière pour conclure à la nature ondulatoire de la lumière. Maxwell* a étendu cette analogie à la caractérisation du champ électromagnétique*, et utilisé des analogies hydrodynamiques pour établir ses célèbres équations du champ.

Les principes variationnels* sont à l'origine de nombreuses analogies entre la mécanique classique*, la théorie des champs, la thermodynamique*, l'électrodynamique et la théorie de la relativité* et la mécanique quantique*. Une même structure mathématique est à l'origine de ces analogies.

ANALOGIE OPTICO-MECANIQUE

L'analogie optico-mécanique, qui a joué un rôle central dans le développement de la mécanique ondulatoire*, établit une correspondance entre la mécanique hamiltonienne* et l'optique géométrique*, en tant qu'approximation de l'optique ondulatoire*.

Un formalisme de système hamiltonien* commun laisse voir une analogie mathématique entre le potentiel* mécanique et l'indice de réfraction*, entre les trajectoires mécaniques et les rayons optiques. C'est cette analogie qui est exploitée par Schrödinger pour établir son équation de la mécanique ondulatoire, qui deviendra l'équation fondamentale de la mécanique quantique*. Cette analogie est fondée sur des principes variationnels* communs.

ANALOGIQUE

ANALYSE

Provenant d'un mot grec qui veut dire délier et dissoudre, l'analyse signifie la réduction d'un objet à ses parties. Elle s'oppose à l'opération inverse qui rassemble les parties, la synthèse. Mais les définitions varient selon qu'il s'agit d'opérations matérielles, mentales ou linguistiques.

Dans l'ordre matériel, l'analyse est mécanique, physique ou chimique (analyse qualitative et analyse quantitative)

Dans l'ordre intellectuel l'analyse est logique, philosophique, psychologique.

Dans l'ordre du raisonnement l'analyse est inductive si elle remonte des effets aux causes, déductive si elle démontre une vérité à partir d'une vérité préalable.

En grammaire l'analyse est dite logique quand elle décompose la proposition en ses éléments constituants (sujet, attribut, verbe), grammaticale quand elle prend chaque mot à part pour en faire connaître le statut (espèce, nombre, cas, personne, mode...)

A chacune de ces analyses correspond un procédé, la synthèse, qui va des parties au tout, des causes aux effets, des principes aux conséquences.

ANALYSE DE FOURIER (Cf. Fourier-décomposition de*)

ANALYSE FONCTIONNELLE

Etude des espaces de dimension infinie et de leurs applications. C'est la généralisation de l'analyse des fonctions lorsqu'à la place d'ensembles de nombres on étudie des ensembles de fonctions*. Un des cas les plus importants est celui des espaces vectoriels de dimension infinie et des applications linéaires de ces espaces, généralisation aux fonctions de l'algèbre linéaire* avec substitution aux matrices* du concept d'opérateurs*.

Le développement de l'analyse fonctionnelle est relativement récent et s'est effectué parallèlement au développement de la physique théorique, s'avérant comme un langage privilégié pour la mécanique quantique* et la mécanique statistique*. C'est la mécanique quantique des années 20 et 30 qui a eu une influence décisive sur son développement de par l'usage central qu'elle fait de la notion d'espace de Hilbert* et d'opérateurs*. La mécanique quantique a joué vis à vis de l'analyse fonctionnelle le même rôle qu'avait joué la mécanique classique* vis à vis de l'analyse infinitésimale chez Newton*.

Dans le cadre de l'analyse fonctionnelle on a complété la notion de fonction* par la notion essentielle de distribution*.

ANALYSE INFINITESIMALE (Cf. Calcul différentiel* et Calcul intégral*)

ANALYSE MATHEMATIQUE

Partie des mathématiques consacrée à l'étude des fonctions, et comportant entre autres l'analyse infinitésimale (calcul différentiel* et calcul intégral*) et l'analyse fonctionnelle*.

La formation de l'appareil de l'analyse mathématique ne s'expose pas toujours de manière complète et sans passion. On voit s'exprimer des vues unilatérales sur la nature de la différentielle ou de l'intégrale, une hypertrophie du rôle du concept de limite*, une tradition de l'anathème sur les grandeurs infiniment petites et grandes actuelles (Cf. Analyse non standard*).

Le mathématicien soviétique Pontryaguine a écrit : « *Du point de vue historique le calcul différentiel et intégral était un domaine des mathématiques bien développé lorsqu'apparu la théorie des limites*... De nombreux physiciens considèrent qu'une définition rigoureuse de la dérivée et de l'intégrale n'est pas nécessaire pour une bonne compréhension de l'analyse mathématique. Je partage leur point de vue* »

ANALYSE NON STANDARD

L'analyse non standard concrétise des idées dues à Leibnitz* sur l'existence de grandeurs infiniment petites et non nulles, idée qui dans le développement de l'analyse mathématique* fut remplacée au milieu du XIXème siècle par l'idée de limite*.

Cette incroyance dans des grandeurs actuellement infinies provenait de la difficulté de les fonder de manière formelle. Dans le cadre de la théorie des ensembles au début du XXème siècle s'est mise en place une idée assez dogmatique sur une impossibilité de principe de réhabiliter des grandeurs actuelles infiniment petites ou infiniment grandes, et l'idée de limite* était considérée comme le seul instrument de fondement rigoureux de l'analyse mathématique. Il est curieux de constater la persistance de ce concept d'infiniment petit actuel dans le langage des physiciens malgré les interdictions mathématiques.

Il faut attendre 1961 pour voir développer des méthodes infinitésimales dans le cadre de la théorie des ensembles, par Abraham Robinson.

L'Analyse Non Standard est une façon de faire de l'analyse mathématique dans laquelle il est licite de dire d'un nombre réel qu'il est infiniment-petit une-fois-pour-toutes. Par licite nous voulons dire que du point de vue de la rigueur mathématique, selon les canons les plus modernes de la logique, on ne peut rien lui reprocher. Ainsi une démonstration, via l'ANS, d'un résultat classique peut-elle être transformée en une démonstration classique, ce qui a fait dire à certains que l'ANS n'apporte rien de neuf. Ce n'est pas tout à fait exact. Ce que l'ANS apporte est une nouvelle manière de formaliser le

discours mathématique informel dans un formalisme dont on peut démontrer qu'il n'est pas plus dangereux que le formalisme classique : Si il existait une contradiction dans les mathématiques formalisées dans l'ANS il en existerait une dans les mathématiques formalisées classiquement. Ainsi la question n'est elle pas de savoir si les mathématiques non standard sont rigoureuses mais de savoir si cette nouvelle manière de travailler est préférable à l'ancienne

En 1973 Kurt Gödel a écrit : « *On est tout à fait fondé à estimer que l'analyse non standard, sous une forme ou sous une autre, sera l'analyse du futur* »

Ce n'est pas encore le cas. Dans les années 1980 il était difficile d'évoquer l'Analyse Non Standard sans déclencher des passions.

Comme pour la théorie des distributions*, l'analyse non standard a du mal à s'imposer comme langage en physique, où règnent des pratiques heuristiques peu rigoureuses.

ANALYTIQUE

Comme substantif l'analytique désigne la logique formelle chez Aristote* et l'étude des formes de l'entendement chez Kant*, pour qui l'analytique transcendantale est l'analyse des formes à priori de l'entendement.

Comme adjectif, analytique caractérise l'emploi d'une méthode d'analyse* et se retrouve dans diverses situations : jugement analytique*, philosophie analytique*, esprit analytique (qui considère les choses dans leurs éléments et non synthétiquement dans leur ensemble), géométrie analytique*.

ANALYTIQUE (GEOMETRIE)

ANALYTIQUE (en mathématiques)

ANALYTIQUE (PHILOSOPHIE)

Type de démarche philosophique considérant que le problème essentiel de la philosophie est dans l'analyse du langage (langage naturel ou langage formel*). Démarche anti métaphysique qui est devenue dominante dans le monde anglo-saxon sous l'influence de Ludwig Wittgenstein* et Bertrand Russell*. Héritière du positivisme* et de l'empirisme logique*. Selon elle, l'analyse du langage révèle la structure du monde, l'étude des mots permet de mieux comprendre le

réel*. Philosophie de langue anglaise pour des lecteurs de langue anglaise, elle se veut porteuse d'un idéal opposé à la philosophie continentale* par son attachement à la science, ce qui marque la continuité d'une certaine tradition de l'empirisme*.

En fait, par delà l'âge classique, la philosophie analytique contemporaine se sent très proche du nominalisme* médiéval.

ANALYTIQUE/SYNTHETIQUE (JUGEMENT)

Division des jugements (phrase, affirmations, propositions) en fonction du mode d'établissement de leur vérité*. Les jugements analytiques sont ceux dont la vérité s'établit au moyen d'une analyse purement logique* et les jugements synthétiques ceux dont la vérité dépend d'une information extérieure. La forme générale d'un jugement étant « S(sujet) est P (prédicat) », ce jugement est analytique si P est « contenu » dans S, synthétique dans le cas contraire. Cette distinction est étroitement liée à la distinction a priori* / a posteriori*, nécessaire*/contingent*.

Cette division se trouve déjà chez Leibniz* qui distingue une « vérité de la raison » d'une « vérité de fait », et chez Hume* délimitant les « relations d'idées » et « l'état de fait ». Mais cette distinction et son appellation sont clairement énoncées dans la « Critique de la raison pure » de Kant*. En fait Kant et les positivistes logiques* identifient la classe des vérités synthétiques avec la classe des faits empiriques, et les jugements analytiques avec les données conventionnelles du langage qui ne comportent aucune connaissance sur le monde. Dans la sémiotique moderne cette distinction revient à différencier ce qui est engrangé dans la structure initiale du langage et ce qui ne relève pas de la structure linguistique, et apparaît comme nouveauté.

Cette distinction pose de nombreux problèmes et a fait l'objet de nombreuses critiques, en particulier par le philosophe américain Quine*.

ANNEE CHARNIERE- 1927. La naissance du post-modernisme* ?

Il est en général admis de faire débiter l'âge de la science classique avec Galilée*. Plus précisément l'année 1610 est un utile point de repère, à condition de n'occultier ni Képler*, ni l'intense activité intellectuelle antérieure à Galilée, dans l'Italie de la Renaissance.

1610 est l'année où Galilée publie son livre « *Le messager céleste* » qui révèle la révolution copernicienne à l'Europe intellectuelle. Son sens des « relations publiques » joint à ses observations va le faire réussir là où Copernic* puis Képler ont échoué.

De manière analogue, 1927 est une date repère marquant le basculement de la science classique (galiléenne) à la science contemporaine. Cette année là, deux découvertes surviennent totalement indépendantes, mais en forte interaction par leurs conséquences, aux deux extrémités du monde observable, le très grand et le très petit :

Hubble* et Eddington* mettent en évidence l'existence d'un décalage systématique vers le rouge des raies spectrales* émises par la matière constituant les galaxies*, ce qui s'interprète par un effet d'éloignement des galaxies selon l'axe d'observation- l'univers est en expansion.

Heisenberg* participant à un immense effort de cohérence entre la théorie ondulatoire (Fresnel*) et la théorie corpusculaire (Einstein*) de la lumière, aboutit à l'établissement des inégalités* qui portent son nom-certaines observables ne peuvent prendre des valeurs précises simultanément pour un même état* d'un système quantique

1927. Annus mirabilis.

De 1926 à 1928 se concentre une masse incroyable d'évènements scientifiques et intellectuels.

Citons pèle mèle :

1923-1929. Cassirer*. Philosophie des Symbolischen Formen (terminé en 1927)

1922-1925. Théorie de l'information* de Fischer*

1926 Equation de Schrödinger*

Born*. Interprétation probabiliste de la fonction d'onde*

Fondation du Cercle linguistique de Prague*

1927. Hubble* et Eddington*, décalage des raies spectrales des galaxies vers le rouge.

La théorie quantique

Heisenberg*. Le principe d'incertitude*.

**Le Congrès Solvay*. Bohr* et la complémentarité*.
L'école de Copenhague.**

**Jordan* et Von Neumann*. Fondements mathématique de
la mécanique quantique.**

De Broglie*. Théorie de la double solution*

Davisson-Germer. La diffraction des électrons

Dirac*. L'électrodynamique quantique*.

La seconde quantification*

La non linéarité

**Einstein* et Grommer. La relativité générale et la loi du
mouvement.**

Birkhoff*. Dynamical systems

Andronov*. Auto_oscillations* et cycles limites*

La Philosophie

Heiddeger*. Sein und Zeit.

Russel*. The analysis of matter.

**Weyl*. Philosophie der Mathematik und
Naturwissenschaft. (1924. Was ist Materie ?)**

Faure. L'esprit des formes.

Bergson* reçoit le prix Nobel.

Losev*. Le cosmos antique et la science moderne

La philosophie du nom.

La musique comme objet de la logique

La dialectique de la forme artistique

**Cassirer*. Individuum und Kosmos in der Philosophie der
Renaissance**

Meyerson*. L'explication dans les sciences.

1928.

La transmission des signaux

Nyquist*. Certain topics in telegraph transmission information.

Hartley.

Hartley*.Transmission of information.

**On voit ainsi naitre de nouvelles philosophies de la nature. Après
l'idéal laplacien de la science (déterminisme et mécanisme), après
l'énergétisme*, première philosophie de la nature créée par des
scientifiques, la difficulté de créer une philosophie de la nature issue de
la mécanique quantique.**

**La mécanique quantique vit un paradoxe où se manifestent
simultanément : indéterminisme* et incertitude*, associés à une
extraordinaire précision des résultats prévus par la théorie et vérifiés**

par les mesures expérimentales. Dialectique* étonnante à première vue du précis et de l'imprécis.

C'est cette même dialectique qui est en jeu dans le phénomène des auto-oscillations* dont Andronov* comprend la nature en 1927.

Est-ce le début de l'époque post-moderne* ? Peut être.

Sur un fond de crise économique, après la Grande Guerre, s'effondrent les images simplistes du monde, fondées sur des séparations claires entre des catégories extrêmes. Il apparaît que la séparation entre l'ordre* et le désordre*, le phénomène* et l'observation, la réalité* et le langage* est de moins en moins fondée, dans les phénomènes complexes. Le post-moderne* serait marqué par la dissolution des catégories et des formes, la fin des grandes idéologies, le renoncement à l'unité du savoir, une prépondérance de la science comme pratique au dépens de la science comme théorie.

ANNIHILATION D'UNE PARTICULE

ANNIHILATION D'UNE QUASIPARTICULE

ANTHROPIQUE (PRINCIPE)

Inclusion dans un modèle cosmologique* des données relatives à l'univers actuel, comme l'existence de la vie sur terre, sous la forme de conditions nécessaires à l'évolution de l'univers.

ANTHROPOMORPHISME EN SCIENCE

L'anthropomorphisme est une tendance invétérée, consciente ou non, de projeter les qualités humaines sur les phénomènes de la nature et les objets créés par l'homme.

ANTIMATIÈRE

L'ensemble des antiparticules*.

Notre univers n'est constitué que de matière*. L'univers de l'antimatière est un univers parallèle correspondant à un renversement* du temps* dans l'équation de Dirac*.

ANTINOMIE

Apparition dans le cours du raisonnement de deux propositions contradictoires également fondées. Contradiction entre deux

affirmations ou jugements, s'excluant l'un l'autre, mais donnant chacun de son côté l'impression d'être logiquement fondés.

L'antinomie d'Epiménide en est un exemple classique. Epiménide le crétois dit : tous les crétois sont des menteurs. Comme Epiménide est crétois, c'est donc un menteur. Si c'est un menteur son affirmation est un mensonge, ce qui veut dire que les crétois ne sont pas des menteurs. Alors Epiménide dit la vérité et donc les crétois sont véritablement des menteurs.

En fait c'est un sophisme* car on induit l'auditeur en erreur. Dans tout le raisonnement une des lois fondamentale de la logique n'est pas vérifiée. La loi selon laquelle toute pensée véritable doit être fondée sur d'autres pensées dont la véracité est démontrée. De fait il suffit de dire qu'Epiménide est un menteur pour conclure que tout ce que dira Epiménide est un mensonge. Mais on ne peut être d'accord avec cela. Il n'y a pas un tel menteur qui ne dise que des mensonges. Le sophisme est construit uniquement sur le fait que l'on suppose qu'un menteur ment toujours.

En fait, la négation de « Tous les Crétois sont des menteurs. » n'est pas (a priori) : « Tous les Crétois disent la vérité », mais : « Il existe au moins un Crétois qui dit la vérité » (et il faudrait même dire, dans le sens où menteur est utilisé jusqu'ici, « Il existe au moins un Crétois qui dit parfois la vérité »). Donc, il peut exister un ou plusieurs menteurs Crétois, mais il est vrai, celui-ci peut être Épiménide.

L'idée de cette antinomie est à la base de la démonstration du fameux théorème de Gödel* sur l'incomplétude.

La notion d'antinomie est née dans la philosophie antique où elle se dénomme aporie*, et a constitué l'objet de nombreuses discussions dans la philosophie scholastique. L'idée de la contradiction* et de l'union des contraires est déjà présente chez Héraclite* et Platon*. Des antinomies liées à l'espace temps et au mouvement sont formulées dans les apories* de Zénon*. L'idée de l'unité des contraires a été explicitement défendue par Nicolas de Cues* et Giordano Bruno* à la Renaissance.

Kant a utilisé cette notion dans ses tentatives de justification des thèses de sa philosophie selon lesquelles la raison ne peut franchir les limites de l'expérience sensible et accéder à la connaissance des choses en elles mêmes et à la nature du monde. Les tentatives en ce sens amènent à des contradictions car elles rendent possible l'établissement d'une affirmation (thèse) et de sa négation (antithèse) pour les « antinomies de la raison pure » suivantes : Monde fini-Monde infini, Toute substance complexe consiste en parties simples *la matière est divisible à l'infini*- Il n'y a pas de parties simples. La liberté existe dans

le monde, *tout est contingent*-Seule la causalité existe dans le monde *tout est soumis à la fatalité*, Il existe une cause première au monde (dieu) *le monde a un commencement*-Il n'existe pas de cause première *le monde est éternel* .Kant en conclut à l'impuissance de la raison humaine.

Dans l'existence des antinomies Kant voyait une confirmation de sa propre philosophie. Puisque selon lui on ne peut attribuer de contradictions aux « choses en soi » ces contradictions ne concernent pas les choses mais les propriétés de notre pensée et démontrent l'incapacité de l'intellect à connaître les véritables propriétés des choses, confirmant ainsi la signification subjective de l'espace, du temps et de la causalité.

Du point de vue de la logique mathématique*moderne les antinomies de Kant ne sont pas des antinomies car elles ne sont pas exprimées d'une manière logiquement formalisée*. Entre le XIX^o et les XX^o siècles on a découvert un certain nombre d'antinomies au sens véritable du terme en logique* et en théorie des ensembles* ce qui a constitué ce que l'on appelé la crise des fondements* dans ces domaines. On sépare les antinomies en antinomies logiques et en antinomies sémantiques (paradoxes*). Les antinomies ne sont pas le résultat d'erreurs subjectives, elles sont liées au caractère dialectique* du processus de la connaissance, en particulier de la contradiction entre la forme et le contenu. L'antonomie prend naissance dans le cadre d'un processus de formalisation* du raisonnement; elle témoigne du caractère limité de cette formalisation.

Aux antinomies de la raison il faut opposer les antinomies qui sont un reflet logique de la réalité elle-même. C'est le cas pour l'antonomie onde-particule (Dualisme onde-particule*).

ANTIPARTICULES.

Les antiparticules se distinguent des particules par un signe opposé de la charge électrique, du moment magnétique, des charges baryoniques* et leptoniques* et de l'étrangeté*. La plupart des particules élémentaires* possèdent une antiparticule jumelle ayant la même masse et le même spin. Le photon qui n'a pas de charge n'a pas d'antiparticule.

C'était la solution imaginée par Dirac du paradoxe de l'énergie négative dans l'équation de Dirac* (Vide de Dirac*), hypothèse confirmée expérimentalement.

ANTIREALISME

L'antiréalisme s'oppose au réalisme scientifique* alors que c'est l'idéalisme* qui s'oppose au réalisme* en général.

L'antiréalisme est une position plus épistémologique qu'ontologique, en ne niant pas tant l'existence d'objets indépendants de notre esprit que la possibilité de les connaître et leur intervention comme référence dans nos discours. Pour l'antiréalisme l'objectivité* des savoirs n'implique nullement la correspondance avec une réalité « ready-made ». Les choses que nous disons connaître sont, au moins pour une part, constituées par les relations cognitives que nous entretenons avec elles, la façon dont nous leur appliquons des concepts ou par le langage que nous utilisons pour les caractériser.

L'antiréalisme semble historiquement résulter de la « révolution copernicienne » opérée par Kant* : tout ce que nous pouvons connaître doit entrer dans les catégories en termes desquelles nous les pensons et ne peuvent donc pas être connues telles qu'elles sont en elles mêmes. Goodman* parle d'irréalisme pour dire que les mondes ne sont nullement indépendants des systèmes symboliques grâce auxquels nous les élaborons.

Pour Nietzsche* la vérité scientifique est interprétée comme l'effet d'un besoin, le « besoin de protection », et d'un instinct « cet instinct qui pousse à créer des métaphores ». Loin de donner une image fidèle de la réalité la science résulte d'un travail de simplification, de transposition, de travestissement qui fait qu'elle ne parle pas du monde réel mais d'un monde qu'elle a créé. Nietzsche dénonce comme des simplifications abusives ou de pures mystifications la notion de lois universelles et les conceptions du mécanisme*. Dans un esprit très différent des physiciens comme Helmholtz*, Mach* Duhem* ou Poincaré* remirent aussi en question les constructions de la science

Citons parmi les positions antiréalistes, l'instrumentalisme*, le conventionnalisme*, le constructivisme*, et le fictionnalisme*.

Pour Engels* ou Marx*, profondément réalistes mais conjointement constructivistes, la valeur et le sens des sciences ne se comprennent que lorsqu'elles sont replacées dans un processus économique et social. La science est idéologique* au même titre que la religion, le droit ou la philosophie, car elle se trouve liée aux intérêts de la classe sociale dominante.

ANTI-SCIENCE

C'est une attitude critique de la science dans son ensemble, contestant à la fois sa méthode, son objectivité*, son réductionisme* et son pouvoir et son influence dans la société. Cette position s'est développée en particulier après les deux guerres où la science et la technologie ont particulièrement ajouté à l'horreur des combats (usage des gaz toxiques, emploi de la bombe atomique). Globalement ces deux guerres ont été vécues comme une faillite de l'esprit rationaliste*, donc de la science, dans la réalisation du bonheur des peuples. Cet état d'esprit est commun aux diverses tendances politiques, à gauche comme à droite. Il se nourrit principalement aujourd'hui des problèmes écologiques*, des problèmes liés aux biotechnologies (manipulations génétiques*) et des débats sur la régulation des naissances. L'industrie de l'énergie nucléaire fait peur, surtout après la catastrophe de Tchernobyl. Certains mouvements de pensée et de spiritualité affichent clairement leur attitude anti science, comme c'est le cas pour le New Age ou le post modernisme*. On voit dans le monde entier diminuer le nombre d'étudiants en sciences.

ANTI-SCIENTISME

Position philosophique ou vision du monde affirmant la limitation de principe des sciences dans les problèmes de la connaissance. A l'extrême une négation de l'utilité de la science et des données qu'elle fournit. L'anti-scientisme s'oppose au scientisme* et non pas à la science en général. C'est-à-dire l'opposition à la prétention de la science d'être la source de tous les savoirs.

APERCEPTION

L'aperception désigne l'action du contenu général de l'activité psychique sur la perception des objets et des événements avant toute expérience. Il y a là une notion de conscience de soi et de perception a priori.

APODICTIQUE

Se dit en Logique, des jugements qui sont le résultat d'une démonstration et non de l'expérience. On oppose les connaissances apodictiques, la certitude apodictique, aux connaissances sensibles, à la certitude empirique. Dans le cadre de la logique aristotélicienne, l'apodictique est opposée à la dialectique, à l'instar de la preuve scientifique s'opposant à un raisonnement de nature probabiliste.

APOPHTISME

Démarche tendant à obtenir une transcendance* au moyen de négations* successives. Elle est à l'œuvre dans la théologie négative (Cf. Rien*) ou même dans le positivisme logique* de Wittgenstein*. Elle prend acte de l'antinomie* entre l'objet de la pensée (ou du discours) et la pensée (ou le discours). Elle exprime la transcendance* de l'objet de la pensée par rapport à la pensée.

APOPTOSE

Phénomène cellulaire de mort programmée. Les cellules ayant subi ce destin s'entourent d'une membrane plasmique et sont éliminées par les macrophages. L'apoptose se distingue clairement de la nécrose. Un des rôles de l'apoptose est l'élimination de cellules défectueuses. L'apoptose joue un rôle central en remodelant des formations cellulaires initialement formées par prolifération. Cette mort naturelle participe des processus vitaux.

APORIE

Terme grec qui désigne chez Aristote* la mise en présence de deux opinions contraires également soutenables à propos d'une même question. On utilise plutôt aujourd'hui la dénomination d'antinomie*.

L'aporie classique est celle de Zénon* dite d'Achille et de la tortue. Il est facile de constater qu'Achille rattrape une tortue en temps fini. Mais on peut produire un raisonnement laissant douter que cela puisse se produire en temps fini, en arguant du fait qu'Achille doit parcourir successivement une infinité de segments constituant chaque fois la moitié de la distance qui reste à parcourir. Selon Bergson ce paradoxe doit être vu comme le symptôme de l'erreur qu'il y a à vouloir penser le mouvement en termes d'une succession d'immobilités.

Les paradoxes de ce type sont facilement résolus dans le modèle mathématique moderne du mouvement continu tout en ayant une origine profonde. Le continu n'est pas une somme de points fut elle infinie. Un rôle décisif dans cette résolution est joué par la vérification pour les nombres réels de l'axiome d'Archimède : pour tous nombres a et $b > 0$ et $a < b$ il existe un nombre naturel* n tel que $an > b$.

APPARENCE

Caractère immédiat d'un objet. La réalité sans préjugé. Constituant de la physique naive*. Élément de base de la sémiophysique*.

Le peintre Joan Miro parlait de ses tableaux en souhaitant que ce soient les apparences qui frappent l'esprit avant même qu'il ait pu mobiliser les ressources de l'intelligence.

A PRIORI/A POSTERIORI

Une connaissance a priori est une connaissance obtenue avant et en dehors de l'expérience, alors qu'une connaissance à posteriori est la connaissance obtenue par l'expérience. Cette distinction essentielle a été clairement formulée par le rationalisme classique (Descartes*, Leibniz*) qui reconnaissait l'existence de vérités générales et nécessaires distinctes des vérités contingentes* obtenues à posteriori par l'expérience. Des vérités profondes que l'on n'obtient pas par l'expérience mais par l'intuition* intellectuelle. Leibniz* distingue une « vérité de la raison » d'une « vérité de fait ». Reconnaisant par là que le processus de la connaissance n'est pas une simple photographie de la réalité, que l'homme ne se borne pas à refléter le monde mais le crée véritablement.

C'est Kant* qui a donné l'aspect moderne de cette distinction en réservant la notion d'a priori aux formes susceptibles d'organiser la connaissance. Chez Kant ce n'est pas la connaissance qui est à priori mais ce sont les formes qui permettent de l'acquérir. Kant liait la distinction à sa division de tous les jugements en analytiques* et synthétiques. Il en tirait une question devenue célèbre sur l'existence de jugements synthétiques à priori, pour répondre à la question de savoir comment des jugements à priori peuvent néanmoins augmenter notre connaissance.

Ces jugements sont produits par des facteurs a priori- le temps, l'espace, les catégories- qui sont les conditions nécessaires de notre connaissance. Quoique notre connaissance de la nature soit expérimentalement variable, elle place nécessairement les objets de la connaissance dans le temps et dans l'espace. Le temps et l'espace ne sont pas connus par l'expérience, ils nous sont fournis par l'esprit. Ces derniers sont des formes universelles de l'expérience sensible. Ce qui différenciera jugement synthétique a posteriori et a priori, c'est le type d'intuition auquel ils feront appel.

Un jugement synthétique a posteriori impliquera nécessairement l'intervention d'une intuition sensible, un jugement synthétique a priori ne supposera que celle de l'intuition pure. L'intuition pure se composant du temps et de l'espace (qui sont des formes de cette intuition), le dernier type de jugement y recourra obligatoirement d'une manière ou d'une autre. Kant soutiendra que l'arithmétique fait appel au sens interne (le temps), la géométrie elle au sens externe

(espace). Les jugements synthétique a priori portent essentiellement sur deux domaines, les mathématiques et la métaphysique. Les propositions mathématiques sont selon Kant synthétiques a priori, elles ne peuvent être simplement analytiques. Les propositions de la métaphysique critique sont aussi synthétiques a priori. Contrairement à la métaphysique dogmatique qui se perd dans des contradictions, la métaphysique critique que Kant propose est censée elle avoir des bases plus solides, et se fonde sur la possibilité de jugements synthétiques a priori.

L'enseignement de Kant sur l'espace et le temps a joué un rôle de freinage dans le développement de la science. L'espace et le temps n'étant que les formes a priori de nos sens, déterminées par les particularités invariantes de la pensée humaine, les représentations de l'espace et du temps doivent rester invariantes. Kant et ses disciples n'admettaient pas d'avoir sur l'espace et le temps des vues nouvelles

La découverte de géométries non euclidiennes* au cours du XIX^e siècle (par Lobatchevski*, Bolyai, Riemann*) puis la théorie de la relativité générale* qui affirme que la géométrie de l'espace-temps* est non euclidienne vont porter un coup fatal à la croyance en l'existence de jugements synthétiques a priori. Ainsi, les positivistes logiques* (comme le premier Wittgenstein* ou Carnap*) fondent leur pensée sur la négation de tels jugements, en affirmant que toute connaissance provient de l'expérience et que les lois (ou intuitions) logiques ne disent rien sur le monde, ce sont de pures tautologies. Ils sont sur ce point en accord avec le matérialisme dialectique pour lequel toute connaissance provient de la pratique ou Quine* pour lequel la connaissance est issue de l'apprentissage.

Les sciences cognitives* et la théorie de l'évolution* pourraient aujourd'hui réhabiliter l'a priori kantien au nom de l'adaptation* et de la stabilité* de la perception*. Sans parler des conceptions liées à la notion d'archétype*.

APPROXIMATION

Il faut distinguer l'approximation de l'idéalisation* ce qui n'est pas toujours facile.

L'approximation décrit un objet de manière inexacte, ce qui signifie que l'on produit le même objet en en retranchant des parties. Le cas le plus fréquent est celui où une propriété s'exprime par une série* et où l'on utilise que certains termes de cette série.

Ainsi la loi de Mariotte des gaz parfaits $pV=RT$ n'est qu'une approximation de lois plus complexes, mais le gaz sans interactions

entre ses constituants est aussi une idéalisation. La mécanique classique n'est qu'une approximation de la mécanique relativiste lorsque les vitesses sont bien inférieures à celle de la lumière. Ne retenir certains termes dans une théorie de perturbation* constitue une approximation, quoique un choix de termes à signification physique constitue une idéalisation. La formulation de la théorie des perturbations* en théorie quantique des champs* à l'aide des diagrammes de Feynman, permet de considérer chaque approximation comme une idéalisation physique privilégiant certains termes sur d'autres.

Dans une approximation on ne change pas, en retranchant, le caractère physique du système. Il n'est pas toujours clair jusqu'à quel point ce caractère ne change pas

ARCHETYPE

Forme ou figure, structure à priori de la pensée humaine. Image* mentale primordiale précédant l'apparition des concepts utilisés dans la pensée rationnelle. La notion d'archétype relève d'une conception de la forme* où les formes sont données à priori. Elle accompagne cette vision du monde depuis Platon* et s'accomplit chez Kant* (comme condition à priori de la connaissance) pour gagner une célébrité nouvelle dans les conceptions psychanalytiques de C.G. Jung* (où elle est l'équivalent pour la psyché de l'idée* platonicienne).

En fait chez Jung, le concept d'image primordiale glisse vers celui de moule ("forme vide") de l'inconscient, qui se remplit pour donner des images au fil des expériences humaines. L'archétype se donne à lire dans les symboles*, ces images qui font pont entre le sensible et l'intelligible.

Jung a ravivé les interrogations que formulent les physiciens sur la nature archétypique de l'espace et du temps. Témoin la célèbre étude de W. Pauli*, un des pères de la physique quantique, sur l'influence des représentations archétypiques dans la formation des théories de Kepler*.

Mais la physique pourrait surtout tirer parti dans l'avenir, du progrès des sciences cognitives* dans la compréhension de la perception* de l'espace, du mouvement et du temps, ainsi que dans la résolution du débat sur l'existence d'images* mentales.

ARISTOTELISME

Il est arrivé au XVII^e siècle à la pensée aristotélicienne ce qui arrive au matérialisme dialectique* et au marxisme* aujourd'hui. Au nom d'une conception des critères de vérité* inscrits dans les actes et non dans les discours, l'aristotélisme a été rejeté comme doctrine scientifique. Le rejet de l'aristotélisme marque non pas la faillite d'une doctrine, mais l'apparition de nouveaux critères de vérité* qui sous-tendent le passage du monde antique au monde des fabriques et de la production industrielle. Mais entre temps il s'était banalisé et a constitué une matrice de culture scientifique qui fonctionne jusqu'à nos jours sans être clairement reconnue. Témoins tant de termes fondamentaux de la physique hérités d'Aristote* après avoir été retravaillés par la scholastique médiévale. Entre 1200 et 1500 pratiquement tous les étudiants et les professeurs des facultés étudiaient la philosophie naturelle* d'Aristote. Ce n'est pas avant le XVI^e siècle qu'apparaissent des philosophies rivales et cette philosophie est restée dominante jusque dans le XVII^e siècle. Cette pensée a toujours été représentée par la suite, minoritaire, souvent vilipendée, mais essentielle. Fermat*, Leibnitz*, Maupertuis*, Hamilton* et Maxwell* puis nombre de mathématiciens et physiciens du XX^e siècle la soutenaient. A preuve l'illustration de la thèse de l'acte* et de la puissance* dans la formulation variationnelle de la mécanique classique* ou dans la théorie des catastrophes* (saillance* et prégnance*). Quant à la mécanique quantique bien des théoriciens la considèrent comme aristotélicienne.

La doctrine aristotélicienne essentielle est celle du mouvement*.

Aristote a pris la décision polémique de s'opposer aux théories qui posent l'Un comme fondement : au premier chef Parménide* et les Eléates, secondairement Platon* et ses conceptions des Formes* et des Idées* parfaites et éternelles.

Aristote conçoit trois sortes de caractérisations du mouvement :

1. Les principes qui fondent l'analyse du mouvement : le substrat* (hylé*, ousia*), la privation (sterisis) et la forme* (eidos, morphe)
2. Les actes du mouvement : la puissance* (dynamis), l'acte en train de se faire (energeia) et l'acte accompli (entelechia)
3. Les causes du mouvement : la cause matérielle, la cause efficiente ; la cause formelle et la cause finale.

Toutes ces causes se correspondent verticalement. Ainsi : substrat-puissance-cause matérielle.

La science européenne des Temps modernes a voulu se débarrasser de la puissance* et de la capacité* aristotéliciennes. (ou

encore du dispositif expérimental. Mouvement qui a atteint son apogée avec les empiristes* modernes depuis Hume*.

Mais l'histoire de fait de la science montre la réintroduction incessante des notions de puissance et de capacité. Ainsi Monod* dans « Hasard et nécessité » utilise librement le concept, en déclarant que le schéma global d'un édifice multimoléculaire complexe est contenu *in posse* dans la structure de ses parties constituantes mais n'accède à l'existence actuelle que par leur assemblage.

Ce qui aurait certainement fait plaisir à Aristote, c'est le rôle que l'on fait jouer aux potentialités en physique quantique. Ainsi de l'emploi par Popper* de la notion de propension*. Il pense que les ondes (y compris celles de la seconde quantification*) sont des représentations mathématiques des propensions, ou des propriétés de disposition* de la situation physique, que l'on peut interpréter comme les propensions des particules à présenter certaines valeurs pour leurs propriétés .. Les probabilités sont des propensions. Et Popper de reconnaître que la *potentia* aristotélicienne est sa propension.

Le physicien soviétique Fock* oppose en 1967 les probabilités classiques à caractère épistémique* aux probabilités quantiques à caractère ontologique*. Ainsi en physique classique les probabilités reflétaient la formulation incomplète du problème, une incomplétude peut-être pratiquement inévitable, mais en principe éliminable. C'est un tout autre caractère qui s'attache aux probabilités en physique quantique. Elles y sont nécessaires par essence, et leur introduction ne reflète pas l'incomplétude des conditions, mais l'existence objective dans les conditions données de possibilités potentielles. Et de dire que la fonction d'onde* est une expression des possibilités potentielles. Remarquons que dans ce lexique les probabilités classiques et quantiques sont de même nature, seuls leur calcul diffère parce que les événements observables sont différents et que par conséquent la situation physique est sans doute différente (Cf. Probabilités quantiques*).

Piron, axiomaticien de la mécanique quantique, prône explicitement un retour à Aristote, mais contrairement à Fock pour lequel l'état* est la collection de toutes les propriétés potentielles, l'état du système est la collection de toutes les propriétés actuelles* à l'instant donné. Dans sa perspective un système est décrit par ses propriétés (observables*) et où à chaque propriétés sont associés un ou plusieurs tests, c'est-à-dire un projet d'expérience que le physicien pourrait éventuellement réaliser et dont le résultat cherché, le « oui » est bien précisé à l'avance, le « non » représentant globalement tous les autres résultats possibles. En se conformant à une idée exprimée par

Einstein*, il considère qu'un système possède la propriété a si on peut affirmer que le test correspondant donnerait, si on l'exécutait, certainement la réponse « oui » Comme l'affirmation que le résultat positif serait certain, est faite avant même que l'on ait décidé de faire l'expérience, c'est bien là un élément de réalité. Conformément à la terminologie d'Aristote il dit dans un tel cas que la propriété a est actuelle, que le système la possède en acte. Si le test a bien un sens, si l'expérience pourrait être exécutée mais le résultat incertain, il dit que la propriété est potentielle.

ARISTOTELISME/PLATONISME (Cf . Platonisme/Aristotélisme)

ARITHMETIQUE

ARN MESSAGER

ART

L'art est essentiellement la création de formes* et toute perception de formes peut constituer le départ d'une expérience artistique. Mais la reconnaissance des formes est une opération délicate où interviennent des facteurs objectifs, liés aux facteurs généraux de la perception et de la connaissance, et des facteurs contextuels liés à la culture (conditions socio-historiques, choix philosophiques, représentation du monde). Il en est de même pour les caractères artistiques et esthétiques. Si l'art se définit de manière très générale comme une manifestation d'expression* et d'expressivité, assumant un flirt incessant entre art et sémiotique*, le rôle essentiel des formes apparaît précisément dans leur fonction de support d'identité et d'expression, et donc de communication.

Ce jeu complexe des formes dans la détermination de l'art explique l'assimilation fréquente des concepts d'art et de forme, comme cela apparaît clairement dans la dénomination d' « Univers des formes » utilisée dans la dénomination d'une histoire universelle des arts publiée dans la seconde moitié du XX ème siècle. Ou bien encore dans l'écriture par un historien d'art, comme Henri Focillon, d'un livre intitulé « La vie des formes ». Comme l'a si bien dit le philosophe A.N. Whitehead : « Art is the imposing of a pattern on experience, and our aesthetic enjoyment is recognition of the pattern" (Dialogues. June 1943).

La notion de forme est si générale et va tellement au delà d'une simple caractérisation d'objets matériels, mais s'étend à la langue, à la musique ou au comportement, que la tentation a été fréquente de lui donner une existence autonome. C'est ainsi que Platon* envisageait l'existence de formes séparées de la matière (les fameuses idées), alors qu'Aristote* ne l'admettait pas dans sa doctrine hylémorphique. Un débat qui n'en finit plus et qui se trouve au cœur des différentes conceptions de la forme. Ce qui n'est pas sans influence sur les pratiques artistiques, témoin l'art abstrait qui cherche à s'emparer de la forme pure. Les « purs rapports » évoqués par Mondrian.

Définir ce que l'on range dans la catégorie "Art" de la culture, dépend totalement quoique de manière plus ou moins consciente et confuse, des conditionnements historiques et sociaux. Il n'y a pas ou peu d'art naturel et spontané, il n'y a pas d'esthétique universelle même si l'on peut donner des raisons biologiques à l'émotion et au plaisir.

Si la perception est une activité des sens, elle est médiatisée par la connaissance*, et la vision est différente du regard.

Si l'on cherche à définir l'art par une fonction, on peut distinguer deux pôles, que l'on retrouve dans la science : la Beauté* et la Connaissance*. Assimiler l'art à l'accomplissement du beau est tout aussi réducteur que de le considérer comme un reflet* ou une représentation* expressive de la réalité ou de l'imaginaire

A trop assimiler l'art aux démarches techniques qu'il suscite on isole les différents types d'activités artistiques, alors que des approches théoriques renforcent l'unité du champ artistique et soulignent l'importance des phénomènes de synesthésie des sens.

Les considérations de sémiotique* et de rhétorique* tendent à considérer l'art comme un langage* (ou les arts comme des langages) et établissent des passages continus entre les arts visuels et la littérature, la musique et les arts du spectacle.

Les études esthétiques donnent aussi de l'art une image unifiée sinon unificatrice, en soumettant l'art à des analyses philosophiques

Parmi les regards philosophiques contemporains sur l'Art il faut distinguer celui, très influent, du philosophe pragmatique américain Nelson Goodman (1906-1998). Evoluant entre la philosophie des sciences et l'esthétique, entre la direction d'une galerie d'art et la collection d'œuvres d'art, N. Goodman remplace la question : "Qu'est-ce que l'art ?" par la question : "Quand y a-t-il art ?". Goodman cherche à dissocier au maximum l'esthétique d'une théorie des émotions, en rejetant des catégories comme celle de beauté, et à rapprocher le plus possible l'œuvre d'art des œuvres de connaissance,

en en faisant des modes concurrents mais complémentaires de représentation*. On constatera le rabattement de l'esthétique sur les notions d'expression et d'expressivité qui balisent tout autant les domaines artistiques que les domaines scientifiques (sémiotique comprise).

Vouloir distinguer art et science* selon l'opposition objectivité*/subjectivité*, est fatalement voué à l'échec. Sortir volontairement du cadre de la représentation objective scientifique pour entrer dans le domaine de la subjectivité est une illusion.

L'objectivité scientifique pure n'existe pas. Comme si la science ne faisait pas appel à l'imaginaire. Quant à l'art lieu de la création subjective et de l'originalité, il n'existerait pas si la raison ne venait pas sans cesse y tempérer l'imagination. C'est d'ailleurs là le sens profond des mesures esthétiques à la Birkhoff ou à la Moles : une dialectique de l'originalité et de l'intelligibilité, de la complexité créatrice et de la régulation, de la raison constituante et de la raison constituée selon la très jolie expression de notre cher Lalande. L'art comme la science sont des passions tempérées par la raison.

La prétendue objectivité* scientifique est un idéal de la connaissance* que l'on cherche à réaliser par tous les moyens constructifs à notre disposition. Ce faisant le scientifique cherche à faire explicitement, comme l'artiste d'ailleurs, ce que son cerveau fait inconsciemment sans cesse dans l'accomplissement de ses fonctions perceptives et cognitives. L'objectivité c'est la nécessité de rechercher de la stabilité et des invariances dans un univers ou tout fluctue sans cesse et où notre subjectivité s'affole et se noie. La redondance liée à l'ordre est comme une bouée de sauvetage dans un univers mental où nous cherchons par tous les moyens à nous en libérer par compression de l'information.

Le savant comme l'artiste aspire à l'objectivité, gage de la communication et de la compréhension (de l'explication peut être) tout en craignant sans cesse de la voir tarir la source de l'inventivité et de la singularité.

On ne s'étonnera donc pas de voir des chercheurs en histoire des sciences, comme Lorraine Daston ou son complice Peter Galison, s'intéresser à l'histoire de l'objectivité. L'objectivité des uns n'est pas celle des autres. L'objectivité est subjective. La Relativité nous a d'ailleurs appris à nous méfier de ce que déclarent voir les observateurs. Tout dépend de leur état de mouvement. Ainsi un observateur uniformément accéléré appellera vide* ce qui pour un observateur inertiel est manifestement plein. (Techniquement c'est la

différence entre le vide de Fulling-Rindler et le vide de Minkowski !). Un observateur accéléré dans le vide voit surgir de partout des particules. On n'en croit pas ses yeux. Où est passée l'objectivité ??

Quant à affirmer que l'art ne cherche pas à contribuer au progrès des connaissances scientifiques, c'est là une contre vérité historique évidente. Il suffit pour s'en convaincre d'évoquer le rôle joué par la perspective et les techniques de représentation (cartographiques en particulier) dans la constitution de la vision mécanique du monde. Sans parler du rôle de la photographie au cœur de toutes les sciences au XIX et au XX èmes siècles. Une photographie qui n'est pas un simple procédé technique d'enregistrement de données, mais participe par son esthétique à la mise en scène du savoir et à la stimulation de l'imaginaire scientifique du chercheur (en astrophysique, en biologie ou en microphysique).

La distinction entre scientifique et artiste se dissout d'ailleurs dans la notion de créateur : celui qui donne à voir ce qui n'a jamais été vu, celui qui donne à comprendre ce qui n'avait jamais été compris.

Szent Gyorgi, le grand biochimiste et biologiste, découvreur de la vitamine C dans le paprika de sa Hongrie natale, disait : « Le génie c'est de passer où tout le monde est passé, et de voir ce que personne n'a vu ».

A la Renaissance le renouvellement du contact avec la pensée antique fait apparaître la notion d'individu créateur. L'esthétique* proprement dite ne pourra apparaître qu'une fois conçue la corrélation intime entre la notion de beau et de création, celle ci faisant de celui là une forme et une valeur. On a souvent tendance à rattacher la naissance de l'esthétique* moderne à la reconnaissance théorique d'un rôle effectif de la sensibilité et de l'imagination dans la création artistique, au détriment de la raison ; ce qui correspond d'ailleurs à une manière traditionnelle de présenter la naissance du Romantisme.

Ce que l'on appelle art dépend beaucoup des époques historiques. La notion d'art a été bousculée par des créateurs comme Marcel Duchamp* ou Andy Wahrol* qui ont créé une dissociation entre l'art et l'esthétique. Dans le monde contemporain, monde de la communication de masse, où l'existence s'acquiert par participation à un réseau, il s'opère une distinction embarrassante entre l'esthétique et l'art contemporain. Esthétique est le terme qui convient au domaine d'activité où sont jugés les œuvres, les artistes et où paraissent les critiques. L'esthétique insiste sur les valeurs dites réelles, substantielles ou encore essentielles de l'art. En revanche, artistique délimite le champ des activités de l'art contemporain. Le terme insiste sur la

dénomination : sera dite artistique toute œuvre qui est désignée comme œuvre d'art par son appartenance au réseau.

ART ABSTRAIT

L'art abstrait est une invention du XX^e siècle.

Une enquête minutieuse sur ce qu'en pensaient les acteurs et les commentateurs montre une multitude d'opinions et un emploi multiforme du mot abstrait. En définitive une certaine confusion sur ce que l'on considère comme de l'art abstrait. On peut considérer comme démarche abstraite tout ce qui s'écarte d'un certain réalisme figuratif, mais à ce compte là il y'a de l'abstrait partout et l'on n'est guère avancé.

L'art abstrait se définit plutôt par son histoire dans le milieu culturel du début du XX^e siècle.

Au cours de la deuxième décennie du vingtième siècle, un tournant radical et déterminant s'opère en peinture, l'invention de l'abstraction.

Certes, depuis la nuit des temps, des formes non figuratives ont été utilisées au sein de programmes décoratifs, par exemple les grecques ornant les terres cuites de l'Antiquité, le géométrisme de l'art hispano-mauresque, les arabesques des ferronneries baroques ou les volutes de l'Art Nouveau. Mais ces motifs étaient subordonnés à des finalités extérieures, comme l'embellissement d'un lieu ou d'un objet.

La démarche qui caractérise les maîtres de l'abstraction du début du 20^e siècle consiste à proposer, purement et simplement, une "image abstraite". L'oxymore que constitue cette expression, une image étant traditionnellement définie comme une réplique de la réalité, indique la nouveauté de l'entreprise. Les peintures abstraites sont des images autonomes qui ne renvoient à rien d'autre qu'elles-mêmes. Dans ce sens, elles s'apparentent aux icônes de la religion orthodoxe qui manifestent la présence d'un contenu plutôt qu'elles ne le représentent, mais, à la différence de ces images religieuses, les peintures abstraites rompent avec le monde des apparences. Elles révèlent l'existence de réalités jusqu'alors invisibles et inconnues, que chaque artiste détermine à sa façon, selon ses propres convictions, son parcours et sa culture, de l'art populaire aux théories les plus spéculatives. Chacun des quatre artistes pionniers de l'abstraction, Frantisek Kupka, Vassily Kandinsky, Kasimir Malevitch et Piet Mondrian, aboutit ainsi à sa propre formulation de l'abstraction, indépendamment des autres. Ils ont néanmoins franchi le seuil de l'abstraction à peu près au même moment, entre 1910 et 1917, simultanément qui peut s'expliquer par des préoccupations communes.

Ils avaient tous une pratique spirituelle ou ésotérique. Ils étaient aussi, pour certains d'entre eux, très attachés à la musique, le moins imitatif de tous les arts, qu'ils ont parfois pris comme modèle. L'art musical d'Arnold Schönberg* est un art abstrait. Son statut se trouve au-delà de l'opposition constructivisme/expressionnisme (quand la forme est en sa plénitude, l'expression est à son sommet). Le *Traité d'harmonie* affirme, au-delà de l'importance des savoirs et des techniques, la prééminence du souci et de la quête de vérité : " l'artiste n'a pas besoin de la beauté. La vérité lui suffit ". En écho à Cézanne : « Je vous doit la vérité en peinture ».

Une des voies qui mènent à l'art abstrait est la libération de la couleur*, qui résulte des théories de la perception* au XIX^e siècle. On ne doit pas sous estimer le rôle joué par Goethe*, Chevreul* et Helmholtz* dans la constitution d'une optique physiologique qui distingue clairement la perception visuelle cérébrale des données visuelles rétiniennes. Il faut s'interroger sur le rôle joué auprès des peintres par la conscience de ce que la couleur est un phénomène perceptif. Si la couleur est une perception construite et non pas une sensation (impression) directement liée à la nature, les couleurs sont comme des mots du langage, dont le rapport aux signaux de la nature est aussi arbitraire que le mot par rapport à l'objet qu'il désigne. Helmholtz* a effectivement élaboré une théorie de la couleur comme signe*, où les couleurs ne sont plus des règles de la nature mais des sensations. L'art abstrait est un art de l'autonomie* du signe. Plus tard l'étude de l'évolution des langages apportera des éléments essentiels à la compréhension de l'art abstrait et à celle de l'art technologique*, en montrant que les signes ne sont pas donnés ni fixés, mais émergent d'une construction active du receveur-locuteur.

Le passage de la figuration à l'abstraction s'est opéré assez lentement.. Mais le genre aura été bien préparé par l'évolution picturale générale de l'époque, qui aura fondé aussi le cubisme, le rayonnisme, le futurisme, etc., et même le *ready-made* (1913) : l'abstraction n'a pas été une révélation isolée, elle fait partie d'un contexte global extraordinairement créatif dans tous les arts. En particulier les artistes impressionnistes avaient déjà produit des toiles quasi-abstraites, toutes adonnées à la lumière (par exemple dans certains tableaux de Bonnard, les personnages sont presque invisibles).

Les années où apparaît l'art abstrait ne sont pas par simple coïncidence celles où paraissent les « Principia Mathematica » de Russel* et Whitehead*. Si ces mathématiciens entreprennent de déduire toutes les mathématiques de la logique*, les peintres tentent de

montrer que la réduction de l'expression artistique à une logique des relations picturales constitue en soi une esthétique*.

La problématique de l'art abstrait s'inscrit dans un vaste mouvement intellectuel, celui de l'abstraction* et du formalisme* au XX^e siècle. À ce titre il accompagne le développement de la logique formelle moderne (Frege*, Russell*), la formalisation des mathématiques (Hilbert*), les théories physiques mathématiquement abstraites comme la mécanique quantique*, les théories linguistiques structuralistes des formalistes russes (Jacobson*) jusqu'aux grammaires formelles (Chomsky*), la théorie de l'information* à la Shannon* qui exclut les aspects sémantiques* et ne conserve que les considérations syntaxiques*. Sans parler de l'algèbre* moderne ou de la cybernétique*.

Mais si la logique formelle peut être considérée comme une des racines de l'art abstrait, ce n'est pas tant en tant que théorie mathématique qu'en tant que réalisation d'une idéologie plus générale : l'ontologie* formelle de Kant* à Husserl*, Brentano*, Meinong et Heidegger*.

Il faut interpréter le phénomène historique de l'art abstrait non pas comme l'emploi d'un langage* constitué mais comme des recherches dans la constitution d'un langage. Non pas comme une combinaison de signes*, mais comme l'apparition de signes dans une dynamique. Le grand peintre russe Filonov s'inscrit dans cette conception lorsqu'il décrit l'acte de peindre comme un acte « d'émergence* ». De tous les peintres de l'Avant-Garde et de l'Art Abstrait il est celui qui s'intéresse le moins à l'objet ou à la forme finale, mais porte son attention sur la genèse picturale, sur le processus d'engendrement et la dynamique des formes. À la première révolution artistique qui correspond à la disparition de l'objet figuratif, il en substitue une seconde qui privilégie la manifestation du processus* à l'objet qu'il engendre. Au même moment le grand philosophe Whitehead formule des idées semblables. Démarches qui préfigurent le bouleversement scientifique et philosophique lié au développement de la théorie des systèmes dynamiques*. Certains rêvent aujourd'hui de voir se constituer une nouvelle esthétique autour de ces idées.

ART ET SCIENCE

Selon la belle formule de I. Lotman l'art et la science sont les deux yeux d'une même culture. Mais si l'on évoque souvent les relations entre l'art et la science, on précise rarement la nature véritable de ces relations, sauf à dénoncer toute collusion mutuelle et à

revendiquer leur caractère spécifique en les opposant. L'émotion et la raison. L'irrationalité* et la rationalité*.

Il est vrai que le XIX^e siècle a subi l'influence du romantisme allemand, qui s'étend jusqu'à nos jours et qui prône le caractère irrationnel* de l'art. Il s'oppose aux Lumières* et promeut le cœur et la passion, l'irrationnel et l'imaginaire, le désordre et l'exaltation, la couleur et la touche, le culte du Moyen Âge et des mythologies de l'Europe du Nord. Il prend acte d'un certain échec de la raison qui d'après Kant* limite notre connaissance aux phénomènes* pour donner à l'art la mission d'aller au fond des choses. Le mouvement surréaliste prolongera cette ambition tout en faisant crédit à la psychanalyse dans l'exploration de l'inconscient*.

Par delà le caractère anecdotique des situations où l'art fait appel à la science, sous ses aspects techniques, il faut pourtant reconnaître que l'art et la science ont un certain nombre de problématiques communes, liées en particulier à la notion de forme* et au dilemme de la représentation*. Plus généralement on voit bien que l'art et la science sont des modes de connaissance et d'action sur la nature et la société.

Art et science ont aujourd'hui en commun d'être engagés sur des voies abstraites dans un cadre technologique commun, même si dans notre univers informatisé les images et les sons pullulent. Ces démarches abstraites sont rendues possibles par la nature profonde du renouvellement des idées et des connaissances scientifiques au XX^e siècle.

L'art est essentiellement la création de formes* et toute perception* de formes peut constituer le départ d'une expérience artistique. C'est à travers les contributions de la science à l'univers des formes que s'établissent les relations les plus fertiles entre l'art et la science. D'où l'importance de la prise en compte de la culture non linéaire* dans la compréhension de l'art contemporain.

Un statut commun à l'art et à la science apparaît dans l'entrecroisement des conceptions de l'esthétique* et de celles de l'épistémologie*. On voit bien que l'enjeu est le même et exprime toujours la tension entre la représentation* et la réalité*. De fait la plupart des concepts centraux de l'esthétique comme ceux de réalisme* ou d'image* sont les concepts essentiels de l'épistémologie.

Une des problématiques communes à l'art et à la science est celui des rapports entre la matière* et la forme*. Si la matière est le support nécessaire de la forme et de l'information*, la théorie esthétique classique de Kant* à Hegel* et Cassirer* assume la disparition finale du matériau dans la transmission du message. Message bien reçu par

l'art abstrait. La beauté devient abstraite et indépendante du support. Or voilà qu'au XX^e siècle la théorie mathématique de l'information* et les conceptions théoriques de l'informatique* suivent la même voie abstraite, en ramenant tout à un jeu de zéros et de uns. L'art contemporain bat en brèche cette prétention en traitant le matériau indépendamment de la forme. Ne peut-on être frappés de voir de nos jours, sous l'influence des théories quantiques, la théorie classique de l'information battre en retraite devant des slogans provocateurs « *L'information est physique* » ou « It from bit ». Evolutions similaires qui révèlent les rythmes profonds qui sous-tendent en commun art et science.

Plusieurs dynamiques contribuent aujourd'hui au rapprochement entre l'art et la science.

On constate tout d'abord un mouvement de la science vers l'art lié à l'évolution de la science qui tend à brouiller certaines des dichotomies sur lesquelles reposait la séparation entre art et science. Les frontières entre objectivité* et subjectivité*, analyticités* et holisme*, réductionnisme* et non réductionnisme, ordre* et désordre*, deviennent plus floues dans la science contemporaine, qui laisse s'exprimer des démarches que l'on considérait jusqu'alors comme spécifiquement artistiques. La dialectique de la simplicité* et de la complexité*, qui fait le sel de l'attitude artistique, s'est installée au cœur même des théories scientifiques, en particulier lorsqu'elles abordent les systèmes complexes et les systèmes biologiques. L'activité des artistes se trouve soudainement plongée au centre des préoccupations scientifiques et répond aux mêmes interrogations. C'est que la science d'aujourd'hui ne cherche pas seulement à décrire le monde mais s'attache à élucider notre connaissance du monde. Elle vit massivement la réapparition du sujet connaissant, depuis l'observateur* de la mécanique quantique, l'agent des théories subjectives des probabilités* ou bien encore le sujet des sciences cognitives*. Une subjectivité envahissante qui ouvre la science sur l'homme, et offre à l'artiste l'image « rassurante » d'une science moins à la recherche d'une domination du monde. Au fur et à mesure que la science s'engage dans des problématiques de plus en plus complexes, elle découvre les limites de la raison et s'interroge sur l'intelligibilité de l'univers. Ses questionnements rejoignent alors ceux de la pratique artistique en multipliant les points de vue et en privilégiant l'action créatrice aux dépens du raisonnement abstrait.

La connaissance devient art et l'art devient connaissance, dans un univers culturel dominé par des idéaux de créativité.

Artistes et scientifiques vivent dans le même environnement technologique caractérisé par l'omniprésence de l'ordinateur. Leur activité quotidienne aux uns et aux autres est très proche, consistant bien souvent en des manipulations informatiques dans des univers virtuels. Entre la simulation numérique et le computer art, la marge est très faible. Entre l'imagerie scientifique et les arts électroniques la frontière est bien perméable. Elle est souvent franchie. La technologie remodèle la culture en imposant ses démarches à l'art et à la science.

Les contacts historiques entre l'art et la science sont innombrables, en particulier lorsque les artistes trouvent dans la science des motifs d'inspiration. On n'en finirait pas de commenter l'inspiration scientifique des peintres de la Renaissance dans leur emploi de la perspective, de Leonardo da Vinci avec sa culture technologique, d'Arcimboldo dans sa connaissance des multiples formes vivantes, des impressionnistes dans leur découverte des lois de l'optique physiologique, ou de Salvador Dali féru de sciences physiques. Sans parler des architectes de tout temps inspirés par les mathématiques au service de leur imagination créatrice et à la poursuite d'une esthétique* des proportions.

La science permet bien souvent de donner une analyse et une interprétation des œuvres d'art, en particulier lorsque l'on a recours aux sciences cognitives*. C'est le cas pour l'analyse de tous les phénomènes de perception impliqués dans l'expression artistique comme dans le cas de la problématique de la couleur*, de la représentation de l'ombre ou de la nature de la musique. De ce point de vue l'artiste apparaît souvent comme un manipulateur d'illusions*. L'histoire de l'emploi de la perspective* est un des moments majeurs de cette manipulation.

Et pourtant l'art et la science vivent plus que jamais dans des mondes à part.

C'est la marque d'une époque qui vit des dichotomies profondes et des dualismes stériles. D'une époque qui rêve de transdisciplinarité et qui cultive la séparation des savoirs et des savoirs faire. D'une époque qui répand la connaissance tout en cherchant à en cacher le sens. D'une époque qui dissimule son unité profonde en clamant la mort des idéologies*. D'une époque qui proclame le rationalisme* tout en pratiquant largement l'irrationalisme*. D'une époque qui ne connaît pas le partage et vit sans cesse dans la définition de territoires, chasses gardées soumises aux raids des puissances du capitalisme régissant.

Cependant paradoxalement le couple art et sciences est l'objet de toutes les attentions, on lui consacre aujourd'hui colloques,

publications, expositions, voire des programmes entiers de recherche et de formation. Malgré cette proximité, recherchée autant par le monde de l'art que par celui des sciences, ce sont souvent des préjugés anciens qui dominent les discours de l'un sur l'autre. Les sciences envient à l'art son public, " la liberté artistique qui permet aux artistes d'explorer des modes de communication que les scientifiques ne sont pas en mesure de suivre " et confondent l'art avec la communication, notamment lorsqu'il s'agit, comme si souvent, de faire appel aux artistes pour visualiser de manière plus séduisante les résultats de leurs recherches. De son côté, l'art envie à la science sa respectabilité, l'autorité que lui reconnaît la société en échange des vérités qu'elle produit et de la contribution qu'elle apporte au progrès technique.

Le pouvoir et l'argent divisent. L'Art et la Science sont pris dans ces courants de l'histoire qui séparent les hommes des femmes, les riches des pauvres, les intellectuels des manuels, les producteurs des spéculateurs et qui ne s'accordent que sur le point de transformer tous les individus en consommateurs.

Les musées d'art ne font jamais place à la science ; les musées de science ne font appel à l'art que pour des raisons documentaires. L'enseignement général ne fait presque aucune place à l'histoire de l'art et n'en fait aucune à l'histoire de la science tout tourné qu'il est vers l'histoire de la littérature. Comme si l'art non littéraire et la science n'étaient pas des langages.

Les enseignements littéraires sont soigneusement isolés des enseignements scientifiques, alors que les mathématiques "modernes" et la linguistique contemporaine auraient pu servir à les rapprocher.

N'est-ce pas là le signe indubitable de ce fossé qui s'est creusé et s'accroît entre l'Art, considéré comme Humanisme et la Science figée dans une posture inhumaine. La Science fait-elle peur ? Sans aucun doute, car elle s'ouvre aujourd'hui sur des mondes abstraits, mystérieux et lointains, et se trouve lourde de menaces pour le bien être de l'humanité. A côté d'elle la technologie fait figure d'animal sauvage en captivité. De ce fait, les rapports entre l'Art et la Technologie, toujours très profonds, n'ont cessé de s'affirmer au XXe siècle. De nombreux projets et de nombreuses expositions témoignent de cette interaction.

Sans parler bien sûr de l'interaction profonde entre la pratique artistique et les technologies maîtresses du XXe siècle, comme les matériaux plastiques, le laser et... l'informatique.

D'une certaine manière l'art contemporain n'a que simulations et images virtuelles à la bouche. Esthétique numérique, figures

fractales, design informatique s'infiltrerent de toute part dans le champ artistique.

Mais où est la Science dans tout cela ?

N'aurait-elle rien à dire ?

L'Art et la technologie ont toujours interagi. Mais une technologie ne fait pas l'art pas plus qu'elle ne fait la science. L'usage massif et monstrueux de la technologie dans l'art comme dans la science contemporaine ne fait bien souvent qu'accentuer le manque de signification profonde de ces activités. Des déluges de faits dans des déserts d'idées.

L'histoire de l'art et l'histoire des sciences révèlent de profondes correspondances entre ces deux activités à une époque donnée, où l'on voit se manifester des préoccupations et des thématiques communes.

Ainsi on constate avec intérêt à la fin du XIX^e siècle une démarche commune qui tend à libérer la représentation de la contrainte du réalisme. Une prise de conscience de l'écart entre notre perception et notre représentation du monde et le monde tel qu'il est supposé être en notre absence. La connaissance n'est pas une copie de la nature. En physiologie de la perception s'élabore une conception de la sensation qui l'éloigne de l'image chez Helmholtz* et Mach*. En physique apparaît un mouvement symboliste, adossé au renouveau de la logique, dont les porte paroles sont Helmholtz*, Hertz* et Cassirer*. Toute une époque se pare de préoccupations formalistes et s'enfonce dans l'abstraction emmenée par Wittgenstein* et les positivistes logiques*. C'est là que la peinture choisit de s'écarter de la représentation réaliste et de la ressemblance pour s'acheminer à travers les Impressionnistes, et les Symbolistes vers l'art non figuratif et l'Abstraction. Dans les deux cas un univers des signes se substitue à un univers des images. Par sa démarche modélisatrice*, constructiviste* et abstraite la cybernétique* a joué un rôle essentiel dans la pensée scientifique comme dans la création artistique. De fait la cybernétique remplace une conception mimétique de la science comme miroir de la nature par une conception constructiviste comme simulacre* de la nature.

Dans la seconde moitié du XX^e siècle apparaît en science une nouvelle doctrine sur l'origine des formes qui fait la part belle à la confrontation de l'ordre* et du désordre* et à la complexité*. Ce sont les théories de l'auto-organisation* qui privilégient l'émergence* des formes sur leur création selon un dessein intelligent*. C'est là que l'on voit toute une activité artistique s'ouvrir au hasard et à la création automatique, à travers l'art algorithmique, en particulier par l'emploi des fameux automates cellulaires*. L'art se trouve aujourd'hui pris

dans la spirale de la culture non-linéaire*, un mode de pensée qui envahit petit à petit le champ des connaissances.

Au cours des XIX et XX èmes siècles les relations entre l'art et la science s'établissent sur un mode « métaphorique ». La science fournit à l'art des représentations ou des modèles abstraits du monde que celui-ci transfigure en images sensibles. La science donne des idées, propose des conceptions du monde, de la réalité, inspire, suggère, travaille l'art par en dessous. Il suffit de rappeler l'influence des travaux sur l'optique et la couleur*, le rôle de la théorie de l'évolution de Darwin* dans les mentalités des artistes ou les interrogations sur la représentation provoquées par les géométries non euclidiennes ou la psychanalyse*.

Cette relation métaphorique est fortement remise en question par la technologie numérique*. Tout y revient à l'utilisation de programmes informatiques* qui utilisent des modèles de simulation qui sont des interprétations formalisées du réel. Les artistes numériques sont obligés de créer du sensible à partir de l'intelligible, ce qui renverse en quelque sorte le rapport que l'esthétique propose en général, en faisant naître l'intelligible à partir du sensible. Cela a pour conséquence de donner à la technique et à la science une part de plus en plus importante dans l'art. Avec le numérique la science ne peut plus être interprétée métaphoriquement, elle impose directement et de l'intérieur sa présence à l'art en lui fournissant par le biais des modèles de simulation ses matériaux, ses outils et ses processus.

Historiquement Art et Science changent de nature et de statut.

L'art moderne qui ne dépend plus des Salons est l'art des avants gardes et de la consommation de masse. La science moderne du XX^e siècle, qui ne dépend plus des Académies, est une science des grandes avants gardes et de nouvelles conceptions du monde fascinant un large public. Face à une vision dite classique de l'univers qui nous entoure, ces conceptions ont du mal à s'imposer. Témoins les résistances à l'art abstrait* et à la relativité ou à la mécanique quantique. La culture a du mal à s'affirmer à travers ces manifestations, quoique la culture classique soit en recul.

L'époque que nous vivons est bien différente, car c'est une époque de communication de masse par l'effet de certaines avancées technologiques mises à disposition de tout un chacun. Se met en place un réseau mondial qui tourne en boucle sur lui-même et où les producteurs deviennent eux-mêmes consommateurs. Le public assiste impuissant comme spectateur On assiste à une dichotomisation entre l'esthétique* et l'art contemporain, entre le savoir* et la science*. La

notion de culture a du mal à prendre figure. Mais l'art comme la science y sont de plus en plus imbriqués.

ART ET TECHNOLOGIE

Cette terminologie est largement usitée pour dénommer la création artistique prenant comme objet et/ou comme sujet les technologies contemporaines. Cependant, la conjonction de coordination semble indiquer qu'il s'agit encore d'un mariage contre nature. Elle marque une dissociation ou plutôt une association forcée. A "art et technologie" on peut aujourd'hui associer l'expression "art électronique". Cette proposition nominale désigne les arts qui utilisent les "nouvelles technologies" qui de fait reposent sur l'électronique. "Electronique" qualifie un certain type d'art et témoigne d'une pratique artistique intégrée sans présumer du sujet de cet art.

Les rapports de l'art et de la technologie ne sont pas nouveaux, mais ce qui est nouveau au début du XX^e siècle, c'est une tendance dans l'évolution du modernisme artistique, se donnant comme programme l'union de la création artistique et de la création technologique. Elle remonte au début du futurisme avec son pathos de réception des succès techniques du siècle nouveau, interprété comme le témoignage du passage de « l'époque de l'homme » à « l'époque de la technique » : « fini le règne de l'homme, advient le siècle de la technique » (Marinetti). Le « Premier manifeste du futurisme » (1909) comme le « Manifeste technique de la littérature futuriste » (1912) proclament l'avènement d'une nouvelle civilisation de la fusion de l'homme et de la machine, avec sous nos yeux l'apparition d'un nouveau centaure- l'homme sur la motocyclette, et l'arrivée de nouveaux anges volants sur les ailes des avions. Et de proclamer de surcroît que nous sommes nous-mêmes des machines ou des mécanismes.

Ce programme de l'art machiniste se réalisera dans l'art cinématique, depuis le futurisme jusqu'au « portrait de la machine » de Tinguely (1965). La transformation historique de l'idée d'un art machiniste passe par les expériences de mise en scène théâtrale de Rauschenberg et l'art du happening. C'est l'union des jeux de l'homme et de la machine, où un dispositif technique spécial participe au spectacle. Dans ses rapports avec la cybernétique* l'art verra se nouer un nouveau lien entre l'expression et les machines contrôlées par rétroaction*. L'œuvre de Nicolas Schöffer marque un moment important des rapports entre art et technologie. Elle ouvre la voie à ce qui sera la grande révolution de l'arrivée des ordinateurs* et l'apparition de l'art électronique ou art informatique.

On peut aussi parler de création numérique ou d'art algorithmique. L'œuvre produite par cet art résulte d'un processus de calcul informatique, processus incrémentiel et constructiviste.. Un peintre tel que Vasarely s'y était essayé mais comme il ne disposait pas des moyens informatiques modernes, ses créations se sont vite essouffées. La création numérique confie à une machine informatique le soin de générer des œuvres, par un processus algorithmique ou de calcul auquel l'artiste n'impose pas nécessairement de direction a priori. On utilise d'ailleurs fréquemment les processus aléatoires, les constructions chaotiques et plus généralement tout ce qui découle de la mise en œuvre des systèmes organisationnellement complexes*, non prévisibles et non descriptibles exhaustivement. Dans ce cas, le rôle de l'artiste consiste d'abord à lancer l'algorithme dans un espace d'états dont il s'est borné à définir les contraintes initiales. L'algorithme se développe alors librement et pourrait "tourner" indéfiniment, en fonction des ressources de calcul disponible. Mais l'artiste l'arrête au moment qu'il choisit. C'est là son second rôle, d'ailleurs essentiel. Il le fait lorsque tel résultat de calcul, à tel moment, lui paraît au mieux correspondre à une émotion qu'il portait en lui sur le mode inconscient et qui se trouve ainsi révélée par ce résultat. Cet art met donc en interaction sélective deux agents différents, un automate auto-adaptatif qui génère de la complexité* sur un mode constructiviste et un humain qui réagit à cette complexité en fonction de la sienne propre.

L'utilisation d'un automate cellulaire* pour générer des œuvres correspond exactement à ce processus. C'est l'automate qui produit des œuvres à partir des règles simples lui permettant de faire apparaître une complexité intrinsèque, mais c'est l'artiste qui arrête l'automate cellulaire quand il estime avoir obtenu un résultat suffisamment significatif au regard de sa sensibilité profonde.

L'art algorithmique se distingue complètement de la production par ordinateur d'images virtuelles appartenant au répertoire iconographique courant. Le contenu de ses images est connu d'avance, même si elles sont manipulées par un processus de calcul informatique, dès lors qu'une partie plus ou moins importante de leur sens initial est conservée. Ainsi ne font pas partie du l'art numérique les images de synthèse et plus généralement les univers virtuels et réalités augmentées dont les films, les jeux vidéo, la publicité et bien entendu la science font aujourd'hui grand usage. Cette exclusion surprendra ceux qui n'ont pas bien compris la profonde originalité de la création numérique.

L'enjeu de l'art numérique est un enjeu 'intelligence artificielle*.

ARTIFICIEL (et Naturel*)

L'artificiel désigne tout ce qui n'est pas naturel*. Définition trop ambiguë, si l'on définit plutôt l'artificiel comme tout ce qui résulte de l'activité de l'homme. Mais comme l'homme fait partie de la nature, son activité aussi. Bien sur comme on le dit, l'habitude constitue une seconde nature. Aussi la démarcation entre le naturel et l'artificiel reste souvent floue.

Le cadre même où habite l'homme, que l'on qualifie ordinairement du mot nature, est un cadre artificiel, résultant de l'activité agricole et industrielle, qui modèle les paysages. Ces activités portent atteinte à la nature, ce qui cause une inquiétude motivant les écologistes, et motive les études de l'écologie*. L'homme va même jusqu'à modifier le cosmos par la création de satellites artificiels.

Si l'artifice modèle le cadre de vie de l'homme et lui fournit les objets matériels nécessaires à son activité et à sa survie, il s'introduit dans l'homme lui-même et dans la vie biologique au travers de manipulations sur les êtres vivants, depuis les croisements animaux et végétaux jusqu'à la procréation dite artificielle.

On qualifie aussi d'artificiel les procédures qui tentent d'imiter* et de simuler* les phénomènes vivants, comme la vie artificielle* ou l'intelligence artificielle*. Sans parler des prothèses d'organes. A la limite ce sont des procédures de falsification*.

L'artificiel peut simplement imiter la nature ou créer des phénomènes ou des objets nouveaux. Les colorants artificiels imitent les colorants naturels. Pour les fibres textiles, on distingue généralement :

- Fibres naturelles comme la laine, la soie, le coton qui est constitué à 100% de cellulose,
- Fibres artificielles comme la rayonne ou la fibranne, faites de 100% de cellulose,
- Fibres synthétiques comme le nylon, le tergal, etc.. dont la formulation chimique est une création de l'homme.

Les matières plastiques et les matériaux composites sont des matériaux artificiels opposés aux matériaux naturels comme les métaux ou l'argile ;

ASPECT (EXPERIENCE D')

Une des plus belles expériences de la physique du XX^e siècle, qui aurait mérité le prix Nobel. Elle marque un tournant essentiel dans la mécanique quantique*.

Il s'agissait de prouver que deux photons jumeaux, émis par paires puis envoyés dans deux directions différentes se comportent comme un objet quantique unique. En conséquence mesurer une observable sur l'un permet de connaître cette observable sur l'autre, comme si les deux photons échangeaient de l'information instantanément.

En fait dans une expérience effectuée à Orsay dans les années 80, Alain Aspect, cherchait à vérifier si certaines corrélations entre les photons jumeaux vérifiaient ou non les inégalités de Bell*. La difficulté de l'expérience résidait dans la production de ces photons à l'aide d'un laser, en fait dans la stabilisation de l'émission suivant une excitation laser. Dans les années 98 cette expérience a été refaite en utilisant des sources d'un nouveau type liées à l'optique non linéaire*. Alors que chez Aspect les mesures sur les photons s'effectuaient après une propagation à l'air libre les séparant d'une quinzaine de mètres, dans les nouvelles expériences, les photons enchevêtrés sont injectés dans deux fibres optiques partant dans des directions opposées et l'inséparabilité subsiste sur plusieurs dizaines de kilomètres.

Les corrélations entre les polarisations des photons* ne vérifient pas les inégalités de Bell mais sont conformes aux prévisions de la M.Q. qui décrit un état enchevêtré*. Tout se passe comme si les deux photons restaient toujours en contact, et si le résultat de la mesure effectuée sur l'un affectait instantanément l'autre, sans que l'on puisse utiliser ce phénomène pour transmettre de l'information à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

L'expérience d'Aspect prouve l'existence de l'enchevêtrement à grande distance, une existence établie aux courtes distances pour les molécules par la chimie quantique* fondée sur la notion d'interaction d'échange*.

ASTROLOGIE

L'astrologie est une tentative de réponse au problème du déterminisme* de la destinée humaine, individuelle ou collective.

Elle a un double aspect : rétrodictif* et prédictif*. Le second aspect la rattache aux techniques de divination.

Elle suppose des connaissances astronomiques* développées. Ce sont les progrès réalisés par l'astronomie* qui profitèrent à l'astrologie, la transformant en la principale méthode de divination à partir des phénomènes naturels. Ce sont les succès prédictifs de l'astronomie pour les choses célestes et la compréhension du rôle de la lune dans le phénomène des marées qui ont encouragé la recherche sur

le rôle des astres dans la détermination des événements humains. Ces succès prédictifs s'exercent dans un domaine où les phénomènes périodiques et faiblement quasi-périodiques dominent. Les cycles dans la position des astres, les saisons, les éclipses font de la mécanique céleste un domaine à part où règne l'ordre et le déterminisme strict.

La théorie contemporaine des systèmes dynamiques* accentue ce caractère particulier de la mécanique céleste où il n'y a pas de distinction entre déterminisme* et prédictibilité*, et où les systèmes instables n'existent pas. Le ciel est le domaine de l'ordre*, il n'est pas le siège de phénomènes dissipatifs* et le hasard* n'y a pas sa place. La mécanique hamiltonienne* y règne en maître avec son instabilité structurelle*.

Au contraire la détermination de la vie et de la destinée humaine s'inscrivent dans une dynamique dissipative dominée sans doute par la stabilité structurelle*. A travers sa totalité le phénomène humain manifeste une stabilité qui ne peut provenir que du rôle qui y est joué par les phénomènes de désordre. La prétention de l'astrologie à vouloir coder du désordre par de l'ordre repose sur une confusion des genres que révèlent les conceptions contemporaines sur la dynamique des systèmes.

A l'évidence si l'on veut étudier l'astrologie par le biais d'une scientificité de nature physique, nous nous trouvons dans un cas indiscutable de discours délirant. On a beau jeu de démontrer que Mercure, le Soleil ou la Lune n'influent d'aucune façon sur une seule personne au monde, et que ce que l'on appelle le zodiaque ne correspond guère qu'à un pur produit de l'imagination. La question à se poser est de savoir depuis quand l'astrologie s'est elle voulue scientifique ? Cette inflexion répond en fait, avec Morin de Villefranche au XVII^e siècle, à la constitution d'une physique objective et à la dominance culturelle du paradigme scientifique. Auparavant, chez Platon*, chez Plotin*, et même chez Copernic* et Kepler* l'astrologie est conçue comme un art symbolique qui met en forme un certain nombre d'images et d'intuitions primordiales. L'astrologie ne se voulait pas scientifique.

L'irrationnel, ce n'est pas l'astrologie en tant que telle, c'est de vouloir la faire sortir de son cadre, qui est celui d'une science des formes symboliques, système de représentation* des structures de l'imaginaire* et de l'inconscient*, pour tenter de la faire rentrer dans un autre cadre, où sans aucune légitimation que la croyance totalement aveugle, on la voudrait objective, causaliste et prédictive.

L'astrologie ne détermine pas le destin de l'homme, elle l'exprime de manière symbolique.

L'astrologie est une combinatoire purement symbolique pour laquelle les figures mythiques des planètes ne sont que des porteurs de signes qui par eux mêmes ne peuvent rien indiquer ni provoquer. C'est uniquement l'homme qui du fait de la synchronicité relativement fréquente entre évènements cosmiques et évènements terrestres, les utilise comme éléments linguistiques. Il a pu ainsi créer un système artificiel de relations* grâce auquel il lui est possible avec une certaine vraisemblance de décrire le caractère et les tendances de la destinée d'un individu.

ASTRONOMIE

ASTRONOMIE DE PTOLEMEE (Réalisme et instrumentalisme)

La dispute entre réalisme scientifique* et instrumentalisme*, qui constitue le fond du problème des modèles* et des simulacres*, a commencé lorsque la théorie des mouvements célestes d'Eudoxe a été remplacée par la théorie d'Aristote. Aristote objectait à Eudoxe que sa théorie était fondée sur des mouvements qui ne pouvaient être les véritables mouvements célestes. Il remplaça les différents mécanismes d'Eudoxe par un seul, comportant 65 sphères cristallines concentriques autour de la terre. La théorie d'Aristote, quoique équivalente à celle d'Eudoxe au point de vue de la reproduction des mouvements apparents des planètes et des étoiles, s'imposa, car Aristote sût convaincre qu'une théorie réaliste devait prendre le pas sur une théorie instrumentaliste. Aristote pensait avoir créé un modèle alors qu'Eudoxe n'avait produit qu'un simulacre.

Insistons longuement sur cette éternelle polémique entre le réalisme et l'instrumentalisme. Pythagore et Platon sont d'une certaine façon les pères de l'instrumentalisme, à cause de leur esprit mathématique, alors qu'Aristote serait le père du réalisme, à cause de son esprit physique. Toute la Science est comme coincée dans cette opposition entre Platon et Aristote. Comme un récit à épisodes de cette guerre des chefs. Mais il faut se pénétrer de toutes ces péripéties pour pouvoir apprécier l'enjeu de la bataille. A moins que comme le disait le philosophe Alain : " On se fatigue d'être platonicien. C'est ce que signifie Aristote".

Le rôle joué par la tradition platonicienne dans la démarche de l'Astronomie, est exprimé par Simplicius, philosophe néo-platonicien du VIème siècle:

" Platon admet en principe que les corps célestes se meuvent d'un mouvement circulaire, uniforme et constamment régulier; il pose alors aux mathématiciens ce problème: Quels sont les mouvements circulaires uniformes et parfaitement réguliers qu'il convient de prendre pour hypothèses, afin que l'on puisse sauver les apparences présentées par les planètes".

Il s'agit de reproduire les phénomènes et non pas d'expliquer comment ils se sont produits. C'est ce que regrettait déjà Aristote quand il disait:

"Mais les mathématiques sont devenues pour les modernes toute la philosophie, quoiqu'ils disent qu'on ne devrait les cultiver qu'en vue du reste".

Aristote est partisan de la modélisation, alors que le recours premier aux mathématiques encours le risque du simulacre.

C'est ainsi qu'a procédé Claude Ptolémée pour bâtir sa théorie astronomique. Il donnait la préférence aux mathématiques devant la théologie et la physique, comme il le dit lui même dans son œuvre astronomique : l'"Almageste". Aussi construit-il un système compliqué de mouvements circulaires uniformes asservis les uns aux autres (le centre de chaque cercle se déplaçant sur un autre cercle), avec pour seul but de reproduire le mouvement des planètes. Mais il ne croit pas à la réalité de ces mouvements circulaires. Dans son ouvrage célèbre : "Pour sauver les phénomènes. Essai sur la notion de théorie physique de Platon à Galilée", Pierre Duhem commente ainsi la doctrine de Ptolémée et la doctrine de Proclus qui adopte celle de Ptolémée.

"Les diverses rotations sur des cercles concentriques ou excentriques, sur des épicycles, qu'il faut composer pour obtenir la trajectoire d'un astre errant sont des artifices combinés en vue de sauver les phénomènes à l'aide des hypothèses les plus simples qui se puissent trouver. Mais il faut bien se garder de croire que ces constructions mécaniques aient dans le Ciel, la moindre réalité."

" Les artifices géométriques qui nous servent d'hypothèses pour sauver les mouvements apparents des astres ne sont ni vrais ni vraisemblables. Ce sont de pures conceptions que l'on ne saurait réaliser sans formuler des absurdités? Combinés dans l'unique but de fournir des conclusions conformes aux observations, ils ne sont point déterminés sans ambiguïté. Des hypothèses fort différentes peuvent conduire à des conséquences identiques qui sauvent également les apparences. D'ailleurs ces

caractères de l'Astronomie ne doivent pas étonner. Ils marquent simplement que la connaissance de l'homme est bornée et relative, que la science humaine ne saurait rivaliser avec la science divine".

Et Duhem de s'exclamer :

"Elle (cette doctrine) est bien loin de l'ambitieuse physique qui en la Métaphysique (d'Aristote) prétend spéculer si profondément sur l'essence des choses célestes qu'elle parvienne à fixer les principes essentiels de l'Astronomie. Par plus d'un point, il serait permis de la rapprocher du Positivisme; dans l'étude de la Nature, elle sépare, comme le Positivisme, les objets qui sont accessibles à la connaissance humaine de ceux qui sont essentiellement inconnaissable à l'homme...".

Pour Duhem toute l'astronomie ancienne était une entreprise "instrumentaliste", où les modèles astronomiques n'étaient que des fictions convenables, des instruments mathématiques utiles pour prédire les positions des planètes sans aucune vérité physique. S'opposant par là à la conception "réaliste" où les modèles astronomiques représentent la réalité physique et répondent à des critères physiques.

Instrumentalisme-simulacre contre Réalisme-modélisation.

Pour des raisons militantes, Duhem a exagéré la situation dans l'astronomie ancienne. Il y eut des oppositions et des critiques de la part des astronomes et des philosophes arabes, surtout en Espagne. Averroes (Ibn Rushd) en particulier a sévèrement critiqué le système de Ptolémée parce qu'il ne nous dit rien sur la réalité physique, et demandait un retour aux sphères concentriques d'Aristote. Fidélité de l'aristotélien.

Lévi Ben Gerson (Gersonide) (1288-1344), le grand savant et philosophe juif provençal, partage cette attitude, car pour lui rien n'a de signification sauf la connaissance du monde tel qu'il est véritablement. Au début du premier chapitre de son Astronomie il écrit:

"Nous avons constaté que même ceux parmi les mathématiciens qui ont fait des recherches appropriées en cette science se sont contentés de trouver un système astronomique

duquel les observations peuvent être inférées approximativement. ils n'ont pas tâché d'élaborer le système astronomique nécessaire selon la vérité".

Et il va essayer de développer ce programme en s'inspirant d'Al Bitruji.

Autour de 1200, l'astronome arabe de Cordoue, Al Bitruji, contemporain d'Averroes, s'était efforcé d'édifier une astronomie selon les principes aristotéliens d'Averroes. Le système d'Al Bitruji, éliminant épicycles et excentriques, se veut en accord avec le calcul tout en se conformant aux principes de la physique d'Aristote. Dans la tradition astronomique médiévale c'est une véritable révolution.

Gersonide se réfère à Al Bitruji comme à "l'auteur de la nouvelle astronomie" et son contemporain Isaac Israeli, l'appelle "l'homme qui par sa théorie a mis en émoi le monde entier".

Les travaux astronomiques de Gersonide lui vaudront la Lune (un cirque y porte son nom) et l'intérêt de Képler au XVII^{ème} siècle.

L'opposition entre l'astronomie ptoléméenne et la physique est généralement conçue au XIII^{ème} siècle dans les termes d'une opposition entre mouvements mathématiques et mouvements naturels. Opposition explicitement utilisée par Guillaume l'Anglais, médecin de Marseille, aux alentours de 1220, pour caractériser l'oeuvre astronomique d'Al Bitruji.

Le simulacre mathématique serait alors comme une seconde Nature. La vraie Nature et la nature Virtuelle. Le Modèle et le Simulacre.

Il faut reconnaître que la Nature Virtuelle a d'éminents défenseurs.

Dans "Le Guide des Égarés" Maïmonide, le plus célèbre des philosophes juifs du Moyen-âge, cantonne l'astronome dans le virtuel:

"Je t'ai déjà expliqué de vive voix que tout cela ne regarde pas l'astronome; car celui-ci n'a pas pour but de nous faire connaître sous quelle forme les sphères existent, mais son but est de poser un système par lequel il soit possible d'admettre des mouvements circulaires, uniformes et conformes à ce qui se perçoit par la vue, peu importe que la chose soit réellement ainsi ou non".

A l'instar de Maïmonide, Albert le Grand et Thomas d'Aquin, les deux maîtres de la Scolastique et de l'Aristotélisme, défendent

Ptolémée, dans un instrumentalisme modéré, en ce sens, que la théorie ptoléméenne (à la différence de la théorie "vraie" dont ils attendent la constitution future) n'est pas conçue comme un ensemble d'énoncés vrais, mais plutôt comme un ensemble de règles de construction des énoncés d'observation.

Thomas d'Aquin écrit:

"Les suppositions que les astronomes ont imaginées ne sont pas nécessairement vraies; bien que ces hypothèses paraissent sauver les phénomènes, il ne faut pas affirmer qu'elles sont vraies, car on pourrait peut-être expliquer les mouvements apparents des étoiles par quelque autre procédé que les hommes n'ont pas encore conçu."

" On peut de deux manières différentes rendre raison d'une chose. Une première manière consiste à établir par une démonstration suffisante l'exactitude d'un principe dont cette chose découle; ainsi, en Physique, on donne une raison qui suffit à prouver l'uniformité du mouvement du ciel. Une seconde manière de rendre raison d'une chose consiste à n'en point démontrer le principe par preuve suffisante, mais à faire voir que des effets s'accordent avec un principe posé d'avance; ainsi, en Astrologie, on rend compte des excentriques et des épicycles par le fait qu'au moyen de cette hypothèse, on peut sauver les apparences sensibles touchant les mouvements célestes; mais ce n'est pas là un motif suffisamment probant, car ces mouvements apparents se pourraient peut-être sauver au moyen d'une autre hypothèse".

De fait l'astronomie de Ptolémée va durer jusqu'à Copernic au milieu du XVI ème siècle. Nicolas Copernic*, tout en proposant de mettre le Soleil au centre du système et non plus la Terre, garde la méthode de Ptolémée, en éliminant un certain nombre d'épicycles: il en conserve 34 sur les 79 que comptait la simulacre ptoléméenne. Au point que son célèbre ouvrage (posthume): " De revolutionibus ", paru en 1543, était précédé d'une préface anonyme, que Képler* dévoila plus tard être due à André Osiander, un théologien luthérien, qui avait peur du scandale que provoqueraient les véritables idées de Copernic. Dans cette préface il s'efforce de rattacher Copernic à la tradition simulatrice:

"L'objet propre de l'astronome, en effet, consiste, à rassembler l'histoire des mouvements célestes à l'aide d'observations diligemment et artificieusement conduites. Puis, comme aucun raisonnement ne lui permet d'atteindre aux causes ou aux hypothèses véritables de ces mouvements, il conçoit et imagine des hypothèses quelconques, de telle manière que ces hypothèses une fois posées, ces mêmes mouvements puissent être exactement calculés, au moyen des principes de la Géométrie, tant pour le passé que pour l'avenir....

Il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies; il n'est même pas nécessaire qu'elles soient vraisemblables; cela seul suffit, que le calcul auquel elles conduisent s'accorde avec les observations.

Il est bien évident que cette science ignore purement et simplement les causes des inégalités des mouvements apparents. Les causes fictives qu'elle conçoit, elle les conçoit pour la plupart comme si elle les connaissait avec certitude; jamais, cependant, elle ne les conçoit en vue de persuader à qui que ce soit qu'il en est ainsi dans la réalité, mais en vue d'instituer un calcul exact. Il peut arriver que des hypothèses différentes s'offrent à celui qui veut rendre compte d'un seul et même mouvement; tels l'excentrique et l'épicycle en la théorie du mouvement du Soleil; alors l'astronome prendra de préférence l'hypothèse qui est la plus aisée à saisir, tandis que peut être le philosophe recherchera plus volontiers la vraisemblance; mais ni l'un ni l'autre ne pourra concevoir ni formuler la moindre certitude, à moins qu'il n'ait reçu une révélation divine..... Que personne, touchant les hypothèses, n'attende de l'astronomie aucun enseignement certain; elle ne saurait rien lui donner de tel. Qu'il se garde de prendre pour vraies des suppositions qui ont été feintes pour un autre usage; par là, bien loin d'accéder à la Science astronomique, il s'en écarterait, plus sot que devant."

On ne saurait être plus clair. Tout physicien devrait avoir lu ce texte. Tout lecteur doit se persuader qu'il y'a là une antidote essentielle à ce credo populaire qui voudrait que la Science soit nécessairement une Révélation du fond des choses.

De par les efforts de Galilée*, de Kepler* et de Newton* on accédera pourtant aux véritables lois du mouvement des planètes. Jetant par là même aux oubliettes le système de Ptolémée et perdant peu à peu la conscience de ce que le débat entre l'astronomie mathématique et l'astronomie physique a été pendant dix siècles le

premier grand débat sur la nature de la représentation du monde apportée par la Science. Débat fondateur, qui garde toute son actualité dans la Science Contemporaine, sans donner lieu malheureusement à des mises en garde aussi nettes que celles que nous avons rencontrées en ces siècles intermédiaires. Il en résulte des pratiques et des discours dont le statut est peu clair sinon mystifiant. D'une certaine façon nous nous trouvons dans la même situation épistémologique et philosophique qu'au Moyen-âge. Eternel retour de la grandeur et de la misère de la Science. Einstein pensait à la fin de sa vie qu'il fallait reprendre la Science avant Galilée. Chiche!. De nos jours le débat sur le réalisme scientifique a repris et fait rage.

Terminons cette présentation essentielle par les belles remarques de l'historien des sciences Alexandre Koyré, qui résume toute l'histoire que nous avons racontée..

"Chez Ptolémée lui-même (dans l'Almageste) la réalité des cercles n'est jamais affirmée et ils ne sont que des expédients mathématiques. L'opposition entre mathématiciens et philosophes aboutit finalement à une épistémologie purement pragmatiste et phénoméniste qui, désespérant de pouvoir déterminer les mouvements réels des corps célestes, n'assigne à l'astronomie que la tâche de constituer un système calculatoire lui permettant de prévoir et d'ordonner les phénomènes. La fameuse injonction platonicienne: *salvare apparentias*, qui, tout d'abord, voulait dire: retrouver la structure intelligible de ce qui apparaît, change de sens et devient la devise d'une science qui renonce à la connaissance de la réalité et s'en tient aux apparences seules. Pour l'histoire de cette discussion entre les "réalistes" et les "positivistes", discussion qui commence dans la science hellénistique avec Proclus et Simplicius, se poursuit dans la science arabe et la scolastique latine et donne lieu à des péripéties et des alliances surprenantes (ainsi les Averroïstes qui nient résolument la réalité des cercles de l'astronomie et adoptent donc, par fidélité à Aristote, une épistémologie phénoméniste *pour les astronomes*, se trouvent être alliés des nominalistes Occamistes qui nient la valeur objective de la science naturelle comme telle au profit non pas d'Aristote, mais de la révélation).

Copernic, bien entendu, ne pouvait pas ne pas être au courant de ces discussions, ceci d'autant moins que Padoue était le centre de l'Averroïsme. Il se peut même que l'attitude des

Averroïstes ait renforcé en lui le désir de réformer l'Astronomie en la fondant sur la découverte des vraies lois des mouvements réels. En effet, l'attitude des "positivistes" antiques et médiévaux, dont la doctrine, généralement modernisée et mésinterprétée par les historiens positivistes modernes, ne consiste pas dans *l'adoption* d'un nouvel idéal scientifique mais, vu que l'essence des choses et leurs liens causaux réels demeurent inaccessibles à notre connaissance, dans le *désespoir*, ou la *renonciation* à la possibilité d'atteindre la vérité, soit dans un domaine déterminé du réel, l'astronomie, soit (les sceptiques et les nominalistes) dans tous les domaines de la connaissance naturelle. Le positivisme antique et médiéval comporte toujours une dévalorisation de la science qui ne traite que des phénomènes (apparences) par rapport à celle qui traite, ou traiterait, du réel. Il est par conséquent, à l'opposé du positivisme moderne, qui nie non pas la connaissabilité, mais l'existence même d'un monde de réalités sous-jacentes aux apparences, et qui se glorifie de son irréalisme".

Un irréalisme logique contre un réalisme illogique. Le choix est délicat .

ATHEISME

Doctrine qui consiste à nier l'existence d'un Dieu*. Rejet de l'existence de Dieu et des preuves apportées pour l'admettre. Tout dans l'Univers s'explique par une aveugle nécessité* ou un capricieux hasard*. Il y a de nombreux philosophes athées, Leucippe*, Epicure*, Démocrite*, Lucrèce* ; et dans les temps modernes, Diderot*, d'Holbach*, Proudhon* ou Marx*.

ATOME

Plus petite partie d'un élément chimique. La combinaison des atomes les uns avec les autres engendre les molécules et les solides. Un atome contient un noyau* lourd chargé d'électricité positive et constitué de protons et de neutrons. Autour du noyau sont disposés des électrons qui sont responsables de toutes les propriétés chimiques des atomes. On connaît 105 atomes contenant de 1 à 105 électrons, rangés dans cet ordre et classés dans le tableau périodique de Mendeleïev*.

ATOME DE BOHR

ATOME DE RYDBERG

Circular Rydberg atoms combine a high principal quantum number n (51 or 50 in our experiments) and maximum

$$\ell = |m| = n - 1$$

orbital and magnetic quantum numbers. In classical terms, the orbit of the electron around the core is a circle. The quantum wavefunction is a very thin torus located around the circular orbit of Bohr's model. The

following figure presents the wavefunction of the circular state with $n = 50$ (surface of equal probability density, 50% of

ATOME D'HYDROGENE.

ATOMES FROIDS

ATOMISME

Ensemble des doctrines relatives à la structure discrète (particulaire, atomique ou moléculaire) de la matière. L'atomisme remonte à l'Antiquité et présente des aspects scientifiques, philosophiques et idéologiques* (Cf. Atomisme et idéologie*). On dit d'une théorie qu'elle est atomistique lorsqu'elle veut expliquer le réel en le décomposant en éléments simples. C'est une théorie réductionniste*.

Système de philosophie qui explique le monde par l'existence des atomes*. On le trouve dans l'Inde où il fut professé par Kanada* et Gautama*, mais il est surtout connu par la forme que lui donnèrent les Grecs.

Leucippe et Démocrite* expliquaient tout par le vide* et par les atomes*, éléments éternels, indivisibles, indestructibles, qui animés d'un mouvement essentiel, s'agitaient librement dans le vide, et y formaient, par l'effet du pur hasard*, toutes les combinaisons qu'on voit dans le monde (Cf. Atomisme et hasard*). Epicure* modifia légèrement ce système en douant les atomes d'une sorte de liberté, en leur donnant une forme courbe ou crochue et un mouvement oblique (clinamen) afin qu'ils pussent s'attacher les uns aux autres. Le poète latin Lucrèce* mit en beaux vers cette philosophie dans De Natura Rerum.

Sous toutes ses formes, l'atomisme, expliquant le monde par le hasard ou la nécessité, conduisait au matérialisme* et à l'athéisme*. Après avoir longtemps, dans un Moyen-âge influencé par Aristote*, qui ne croyait ni au vide* ni aux atomes, cessé de jouer un rôle, l'atomisme a été ressuscité au XVII^e par le philosophe Gassendi*, restaurateur de la philosophie d'Epicure*, qui cherchait à le concilier

avec la foi. Il attira l'attention de Descartes*, de Newton* et de Leibnitz qui identifia les atomes avec ses monades*.

Vers la fin du XVIII^e siècle, avec la chimie* naissante, l'atomisme change de statut en devenant une hypothèse scientifique en accord avec des faits expérimentaux. C'est Dalton* (New system of chemical philosophy 1810) qui le premier conforma l'hypothèse des atomes aux lois des proportions chimiques, et en fit un auxiliaire utile dans la notation des faits de la chimie. Les idées de Dalton, adoptées par Davy* et Berzelius* conduisirent au prodigieux développement de la notation des atomes et des liens entre eux pour construire des formules correspondant aux corps objets de la chimie. Cette théorie de la formule chimique contribua au prodigieux développement de la chimie et de l'industrie chimique au XIX^e siècle. Les succès de la synthèse organique conduiront à une apothéose avec la création des premiers polymères* vers 1940.

Au coeur de cette théorie de la structure chimique des corps trône le tableau* de la classification périodique des éléments* de Mendeleev*(1869) .Mais l'atome va progressivement devenir la proie des physiciens. Maxwell* et Boltzman* utilisent l'hypothèse atomique dans leurs études de physique statistique*, alors que des savants comme Duhem* et Mach* nient l'existence des atomes. Ce sont des physiciens, Einstein* et Perrin* qui apportent la première preuve décisive de l'existence des atomes au tout début du XX^e siècle. Appliquant au mouvement brownien* expérimental les formules issues de la théorie atomistique développée par Einstein*, Jean Perrin donne une évaluation prodigieusement voisine de celle des chimistes du nombre d'Avogadro*. Henri Poincaré* s'exclame : < On voit les atomes puisqu'on les compte>. Jean Perrin écrit alors un livre de vulgarisation qui fait date : *Les atomes* et reçoit en 1926 le prix Nobel de Physique. Encore un des nombreux Nobel qu'Einstein aurait dû recevoir.

Après la découverte de l'électron en 1897 des modèles d'atomes sont proposés les considérant comme des électrons tournant autour d'un noyau positivement chargé. L'explication des spectres observés pour les atomes est proposée par la mécanique quantique* et l'équation de Schrödinger* en 1926. Il apparait que les électrons sont responsables des propriétés chimiques des atomes, en particulier de leurs combinaisons. Quant au noyau*, il est responsable des phénomènes de radioactivité découverts par Becquerel* et Curie* et va devenir le héros de la physique nucléaire*.

Mais on ne voit toujours pas les atomes. Leur ombre apparait dans les expériences de diffraction* des rayons X ou des électrons

permettant d'établir la structure spatiale des molécules et des solides. Il faudra attendre l'apparition du microscope à effet tunnel* (1981) pour véritablement voir et manipuler un à un des atomes. De nombreuses expériences viennent alors matérialiser l'existence des atomes comme la production d'atomes froids* ou la réalisation de condensats de Bose-Einstein*.

Au terme de cette longue épopée sait on tout sur l'atome ?

Sans doute non. On aurait aimé pouvoir suivre, si cela a un sens, le réarrangement du nuage électronique lors de la transition d'un état à un autre. Mais on rencontre là les problèmes fondamentaux d'interprétation de la mécanique quantique*, en particulier celui des variables cachées locales*

Ainsi l'atomisme, reste un des grands chapitres de la Philosophie Naturelle, et attend probablement de nouveaux développements, que préfigure sans doute l'étude des particules élémentaires*.

ATOMISME ET CONTINU

L'atomisme s'oppose au continu* tout en entretenant avec lui des rapports multiples inévitables. Le continu s'infiltré dans l'atomisme à la faveur du mouvement*. Dialogue mathématique et physique entre le discret* et l'infini* non dénombrable

Le « Solve et coagula » alchimique*, pris comme représentation opératoire de ce dilemme spéculatif entre l'infini et le fini, constitue sans aucun doute le problème central de la pensée occidentale. Celle-ci se développe en effet selon deux « programmes* » : le programme atomiste (coagula) et le programme continualiste (solve). Selon les époques, selon les hommes, ces deux programmes coexistent, rivalisent, ou dominant tour à tour.

Un va et vient constant entre le local* et le global* dans les démarches cognitives et spirituelles. Un recours au Nombre* ou à la Géométrie*. Une oscillation entre le Réductionnisme* (coagula) et le Holisme* ou l'Organicisme* (solve) au centre des enjeux dans les représentations rivales du monde.

Depuis le XVII^{ème} siècle le programme atomiste a accumulé les succès, laissant croire à une réduction de la compréhension de la réalité à des éléments de base : les particules subatomiques, les atomes*, les molécules*, les gènes*, les individus. Laisant ainsi croire que l'on pouvait atteindre le savoir par décomposition et recomposition. Une idéologie que le XX^{ème} siècle a exacerbé à travers les développements de la cybernétique et de l'informatique, qui mettent au premier plan la représentation atomique (digitale) de

l'information. La modélisation du psychisme à l'aide de réseaux de neurones mathématiques, laissant penser à une modularité de l'esprit, ou l'hyperstockage de l'information sur les disques CD-ROM, c'est le triomphe de l'atomisme. Coagula. Mais dans le cadre même de ces démarches atomistes, l'idéologie continualiste du Solve est sans cesse à l'œuvre. Elle explose dans la notion moderne de Champ*, mise au premier plan par la théorie électromagnétique, les théories de la relativité* (restreinte et générale), les tentatives d'unification* des champs de force fondamentaux (en particulier le champ de gravitation*) et les théories cosmologiques*.

Triumphes du Solve et de la Géométrie. Retour en force de l'idée que le concept central de la physique c'est le mouvement créateur de formes.

Contre Démocrite*, Platon* et Newton*, retour en force d'Aristote* et de Leibniz*.

Notre époque vit même une espèce de leibnizomania.

Un Leibniz qui comme il l'avoue lui même bascula d'un programme vers l'autre.

« Quand j'étais jeune garçon, je donnai aussi dans le Vide et dans les Atomes ; mais la raison me ramena. L'imagination était riante. On borne là ses recherches ; on fixe la méditation comme avec un clou ; on croit avoir trouvé les premiers Eléments, un « non plus ultra ». Nous voudrions que la Nature n'allât pas plus loin, qu'elle fût finie comme notre esprit : mais ce n'est point connaître la grandeur et la majesté de l'Auteur des choses. Le moindre corpuscule est actuellement subdivisé à l'infini, et contient un monde de nouvelles créatures dont l'univers manquerait, si ce corpuscule était un Atome, c'est à dire un corps tout d'une pièce sans subdivision »

Lettre à la Princesse Sophie. VII, p. 377.

Cette insatisfaction liée à l'atomisme est clairement analysée par E. Cassirer* dans la « Philosophie des formes symboliques » (T. 3. p. 500).

« Trois grands noms, ceux d'Aristote, de Descartes et de Leibniz peuvent résumer le progrès de la théorie générale de la nature et de sa forme logique.

La physique aristotélicienne est le premier exemple d'une science authentique de la nature. Sans doute pourrait-on penser que ce titre de gloire revient avec plus de droit aux fondateurs de l'atomisme qu'à lui. Mais quoique la théorie atomique ait créé avec les concepts d'atomes et « d'espace vide » une conception absolument fondamentale et un cadre méthodologique pour toute explication future de la nature, remplir ce cadre lui demeurerait interdit. Car, sous sa forme antique, elle ne pouvait pas maîtriser le problème véritable et fondamental de la nature, celui du devenir. L'atomisme résout les problèmes du corps, en ramenant toutes les « propriétés » sensibles à des déterminations purement géométriques, à la forme, à la position et à l'ordre des atomes. Mais il ne possède pas d'instrument général de pensée pour représenter le changement- de principe à partir duquel expliquer et déterminer légalement l'action réciproque des atomes ».

De fait Aristote est le premier qui parvienne à une analyse réelle du phénomène du mouvement. Ceci en fait automatiquement le premier penseur du continu. C'est ce que souligne René Thom*, dans « Esquisse d'une Sémiophysique » :

« Aristote avait tenté , dans sa Physique, de construire une théorie du monde fondée non sur le nombre, mais sur le continu.

Il avait ainsi réalisé (au moins partiellement) le rêve que j'ai toujours entretenu de développer une « Mathématique du continu » qui prenne le continu comme notion de départ, sans aucun appel (si possible) à la générativité intrinsèque du nombre.

Aristote a été pendant des siècles (peut-être des millénaires) le seul penseur du continu ; là est à mes yeux son mérite essentiel ».

Le continu aristotélicien ne cessera pas de féconder la physique.

Dans une étude sur la Physique aristotélicienne (1962) le philosophe allemand W. Wieland commente cette permanence (archétypale*) de la doctrine d'Aristote.

« En fait la doctrine du continuum appartient aux parties de la doctrine aristotélicienne qui n'ont jamais été contestées

et n'on même pas été mises en doute par les fondateurs de la science contemporaine. Ce qu'Aristote dit du continu appartient même aux fondements de la physique des temps nouveaux, y compris là où elle opère avec des hypothèses atomiques. Avant Planck ces fondements n'ont jamais été considérés dans toutes leurs conséquences, qui auraient pu mener à rejeter le principe de continuité, fondamental pour les hypothèses essentielles de Galilée et de Newton. Seule l'hypothèse quantique de Planck, dont les conséquences logiques attendent encore l'analyse, mènent au delà de l'horizon dessiné par la théorie aristotélicienne du continu ».

Toute la microphysique contemporaine oscille sans cesse entre Solve et Coagula. Soit qu'elle prenne les particules pour objets fondamentaux, et remplisse le Vide* avec des « particules virtuelles* » pour traduire les interactions. Elle construit ainsi les champs* à l'aide de particules, dans un mouvement qui va de Coagula à Solve. La spiritualisation des corps. Soit qu'elle prenne les champs comme concepts fondamentaux et y fasse apparaître les particules comme les « quanta* » des champs. Un mouvement qui va de Solve à Coagula. La corporification de l'esprit.

Solve et Coagula, dialectique du continu et du discontinu, que la science du XX^{ème} siècle a porté à un niveau de tension jamais atteint. Car à l'entrelacs des concepts de particules et de champs, la physique ajoute le labyrinthe du hasard*, où se joue à nouveau l'alternance entre discontinuité (instabilité*) et continuité (stabilité*).

ATOMISME ET HASARD

Que l'atomisme* implique du hasard* est une réalité acceptée depuis l'antiquité. Que le hasard révèle l'atomisme est une conception toute récente.

On n'insistera jamais assez sur le caractère révolutionnaire de l'emploi des fluctuations par Einstein comme révélateurs de « structure discontinue ». Structure atomique de la matière, structure granulaire de la lumière. L'observation de fluctuations trahit la présence de structures discontinues. Le hasard (désordre) révèle l'existence de formes* (donc d'ordre). Un paradoxe qui s'explique car expriment en fait l'apparition de formes est liée à une brisure de symétrie, rupture d'homogénéité en particulier, responsable d'une instabilité qui engendre le comportement aléatoire.

Une vision purement classique de la physique s'exprimerait par la correspondance entre fluctuations et structures. Structure de la

matière (atomes*, molécules*, électrons*), structure de l'eau (amas moléculaires), structure de la lumière (photons*), structure du vide* (particules virtuelles* ?), structure des membranes biologiques (existence de canaux). Dans chaque exemple les caractéristiques des fluctuations expriment la spécificité des structures. L'instabilité qui engendre le comportement aléatoire reflète la microstructure inhérente au système physique. C'est en ce sens que le hasard a partie liée avec l'atomisme.

La réalité de cette microstructure ne découle pas naturellement de son intervention dans un modèle mathématique qui permet de reproduire la phénoménologie probabiliste. Ce n'est qu'une présomption. Eternel doute dans le face à face entre empirisme* et réalisme*. Ainsi les positivistes* ont objecté que la théorie cinétique* des gaz ne prouve pas la réalité des atomes. Par quel effet « sociologique » l'étude du mouvement brownien* par Einstein* et Perrin*, a-t-il créé une conviction en faveur des atomes ? C'était sans doute la phase finale d'une longue évolution des mentalités qui a duré tout le XIX^e siècle.

Contrairement à une vision simpliste, partagée par de nombreux physiciens et par le grand public, le combat pour l'atomisme n'a pas cessé au début du siècle suivant, mais a été finalement un des programmes les plus vivants du siècle. Avec un changement total d'atmosphère de par l'arrivée de la mécanique quantique*. L'atome est devenu un objet quantique*. Et si la notion de hasard n'a pas varié, le calcul des probabilité pour de tels objets a changé, pour permettre la manifestation du phénomène d'interférence*. Un calcul des probabilités quantique* est né.

L'horizon de l'atomisme s'est soudainement élargi. Un atomisme de la lumière est apparu avec comme héros le photon*, conduisant à l'élaboration d'une optique quantique*. Un grand nombre de particules élémentaires* ont été progressivement découvertes ; l'électron*, le neutron*, le positron*, le proton..... Avec comme grande nouveauté la possibilité pour toutes ces particules de se transformer les unes dans les autres. Les atomes se transmutent les uns dans les autres dans le phénomène de radioactivité* qui retrouve les espoirs déçus de l'alchimie* opérative.

Ce nouvel atomisme, l'atomisme des quanta*, se présente masqué derrière les procédures formelles de la quantification*. L'enjeu interprétatif majeur de la mécanique quantique est dans l'établissement du rapport entre quantification et fluctuations. Deux programmes* s'affrontent : le programme structuraliste algébrico-logique et la programme atomistique et probabiliste.

Mais avec la mécanique quantique, l'atomisme de Maxwell*, de Boltzmann* et d'Einstein* a changé de caractère car la description d'un ensemble de n atomes identiques (ou particules identiques) ne s'effectue plus dans l'espace physique ordinaire mais dans l'espace de configuration* à $3n$ dimensions.

ATOMISME ET IDEOLOGIE

L'atomisme* est une vision particulière de la Nature et constitue en tant que telle, un des plus anciens programmes* scientifiques, qui en toutes époques et dans diverses cultures a pu sembler le programme le plus naturel, sinon le seul rendant compte fidèlement de la nature du monde. On a même pu considérer l'atomisme comme une caractéristique de la pensée et de la science occidentales. Il existe effectivement une approche typiquement occidentale de la description de la nature, dérivée des traditions judéo-chrétiennes et de la pensée grecque. La science occidentale est avant tout un moyen d'atteindre le savoir par décomposition et recombinaison. On accède à la compréhension de la réalité par décomposition des objets naturels en éléments que l'on tente de réassembler pour reconstituer les parties du monde. L'atomisme est au cœur de cette démarche.

Au programme atomiste s'oppose le programme continuiste (Cf. Atomisme et continu*). Il y'a de fait un va et vient constant entre deux démarches cognitives, selon que l'on privilégie des considérations locales ou des considérations globales, selon que l'on se livre au réductionnisme* ou au holisme* et à l'organicisme*, selon que l'on a recours au Nombre* ou à la Géométrie*.

Depuis le XVII^{ème} siècle, le programme atomiste a accumulé les succès, laissant espérer en une réduction définitive de la compréhension de la réalité en terme d'éléments de base: les particules subatomiques, les atomes, les molécules et les macromolécules, les gènes. Une idéologie que le XX^{ème} siècle exacerbe à travers les développements de la Cybernétique* et de l'Informatique*, en mettant au premier plan la représentation atomistique (discrète et digitale) de l'Information. Les dispositifs électroniques, la modélisation du psychisme à l'aide de réseaux de neurones* mathématiques, laissant penser à une modularité de l'esprit, ou l'hyperstockage de l'information sur les disques CD-ROM, c'est le triomphe de l'atomisme.

Si la vision atomiste trouve un profond accord avec les réalités naturelles, elle n'en est pas moins marquée au sceau de nombreux éléments de la culture.

Le linguiste Benjamin Whorf a insisté sur le fait que la structure grammaticale d'une langue révèle la manière dont on dissèque la nature et analyse les expériences en terme d'objets et de concepts. Il a suggéré que la structure profonde des langues indo-européennes contient comme caractéristiques fondamentales: la séparation entre le sujet et l'objet, la persistance de l'objet individuel et l'écoulement uniforme unidirectionnel du temps.

Mais l'atomisme occidental ne s'abreuve pas que de la structure de la langue, il est aussi profondément lié à la structure socio-économique. Le sentiment que l'Homme a de son rapport au Corps Social influence profondément l'image qu'il se fait de la Nature. Tout comme le sentiment qu'il de son rapport à son propre corps.

Ainsi l'essor de l'idéologie* individualiste est liée à l'essor du monde marchand capitaliste et des villes, où l'idéologie de l'individu se développe parallèlement à une idéologie de la marchandise. Individus comme marchandises sont des objets mobiles, interchangeable, discernables, susceptibles d'être manipulés.

"L'atomisation des relations sociales qui était le corollaire nécessaire de l'atomisation des relations économiques, produit cette entité impossible et imaginaire: l'individu bourgeois. Le mouvement des sciences physiques s'éloignant du point de vue "organique" (Aristotélicien) pour aller vers un point de vue "géométrique" et "technologique" (Archimédien) ou vers un point de vue "mécaniste" (Descartes et Newton), fut un produit nécessaire de l'introduction de techniques de plus en plus développées pour l'organisation de tous les niveaux de la production, y compris celui des idées. La nature de l'organisation sociale exigée par une société technologique au sens moderne est telle que l'efficacité des parties interchangeables de la machine devienne un principe de relations sociales. Il n'y a qu'un pas du "Je" de Montaigne au "cogito" de Descartes et de là au "clair et distinct". Le "clair et distinct" est une métaphore représentative d'une idéologie de l'entité, produit nécessaire de l'avancée de la physique au XVIème siècle engendrée par la technologie, idéologie cherchant à justifier un programme intéressé non par "le gouvernemnt des hommes "(théologie) mais par "l'administration des choses" (science de la nature)."*

A. Wilden. System and structure. 1980

Tous les concepts de la physique classique, Mécanisme* et Atomisme*, s'inscrivent dans cette perspective de l'Individualisme triomphant. L'identité des objets physiques n'y fait point de doute; la possibilité d'isoler, de séparer, de fragmenter s'exerce souverainement. Le système physique isolé, la trajectoire de la particule, la matière isolée dans l'espace vide, le rayon lumineux, les atomes, les "particules élémentaires", les évènements isolables du calcul des probabilités, participent tous d'une idéologie de l'individualisme physique.

Les rapports de l'objet physique à l'environnement sont conçus comme des perturbations qui n'affectent pas le coeur dur de l'objet primaire.

L'individualisation constitue le mythe fondateur de la physique moderne, qui s'instaure dans un coup de force: la formulation d'une dynamique dont le frottement est exclu et qui ne s'applique en vérité qu'au mouvement des astres.

Il faudra attendre le vingtième siècle pour que ces conceptions physiques individualistes soient battues en brèche par le développement de la physique elle-même. Et cela précisément au moment où l'idéologie de l'individualisme, et l'individualisme tout court, reculent devant les formidables machines sociales engendrées par une technologie triomphante et mal maîtrisée socialement. C'est sur un fond d'idéologie structuraliste et systémique, sur une renaissance des conceptions organicistes* stimulées par le bond en avant de la Biologie*, que se réintroduisent les problèmes de liaison "organique" entre les éléments de la réalité.

L'espace et le temps semblent se recoller dans la Relativité Restreinte*, la matière et l'espace ne sont plus des objets indépendants en Relativité Générale*, le Vide*, si essentiel à l'atomisme, n'est plus tout à fait vide en Electrodynamique Quantique* et en Théorie Quantique des Champs*. La notion de particule élémentaire recule jusque dans le marécage mathématique où coassent les quarks*, les phénomènes de frottement apparaissent essentiels et la Mécanique Quantique révèle entre les "objets" de la microphysique des corrélations dont le statut trouble les physiciens.

La Mécanique Quantique marque à la fois l'apogée et le déclin de l'atomisme universel. Crise d'identité de la particule menant à la fin d'un certain type de réductionnisme primaire. " Les particules ont les propriétés du système, bien plus que le système n'a les propriétés des particules" comme le dit joliment Edgard Morin.

Le succès initial de la physique occidentale a été fondé sur la réussite dans la définition d'objets individuels isolés (ou ce qui revient au même d'expériences reproductibles où la répétition est garantie par la stabilité vis à vis des perturbations extérieures). Cette physique est née dans un monde dominé par une idéologie de l'individualisme.

Ce triomphe de l'individualisme s'incarne aussi dans le langage de l'Analyse Mathématique Classique qui privilégie les considérations locales.

La situation s'est retournée, et l'on assiste aujourd'hui à un passage du Local au Global reflété par la Géométrisation de la Physique. Faut-il s'en étonner dans un monde où le citoyen pèse de moins en moins face à l'État ou aux organisations économiques internationales?

A l'opposé de la conception atomistique du monde, dont l'image de l'horloge, si prisée au XVIIIème siècle, n'est qu'un avatar, on voit se développer une conception continualiste, illustrée dès l'Antiquité par Aristote*, défendue par Leibniz* et prégnante dans l'image du monde comme un organisme*, chère aux Romantiques du XIXème siècle.

L'atomisme est battu en brèche par la doctrine selon laquelle, le tout n'est pas vraiment la somme des parties. C'est la reconnaissance de l'importance du Non-Linéaire*.

L'atomisme cède aussi le pas au continualisme dans une démarche où se modifie le rapport du sujet à l'objet (Cf. Atomisme et continu*). Dans l'atomisme se réalise une stricte séparation entre le sujet et l'objet, une extériorité de l'observateur par rapport au monde, une indépendance entre le langage et la réalité qu'il décrit. L'atomisme participe de la vision du monde des peintres occidentaux de la Renaissance pour lesquels le tableau est une fenêtre ouverte sur le monde. A l'opposé de la conception des peintres d'icônes pour lesquels l'icône est Dieu, donc le Monde, qui regarde l'Homme en l'englobant.

Les difficultés de l'atomisme proviennent de ce qu'il exprime les interactions comme extérieures aux objets. Il y'a d'abord les objets (atomes) puis les interactions. Dans une telle conception, il ne peut y avoir que des interactions à distance. C'est là où le bât blesse, et où la conception newtonienne de l'action à distance va se trouver remplacée au XIXème siècle par la notion d'action de proche en proche, qui va faire éclore le concept de champ*.

L'objet se trouve alors immergé dans sa propre action. L'objet apparaît comme une coagulation de l'action. Un noeud d'énergie dans l'espace du possible.

Mais toute la Microphysique contemporaine oscille sans cesse entre deux attitudes où elle n'arrive jamais à se débarrasser de

l'atomisme. Soit qu'elle prenne les particules pour objets fondamentaux, et remplisse le Vide avec des "particules" pour traduire les interactions. Soit qu'elle prenne les champs comme concepts fondamentaux et y fasse apparaître les particules comme les "quanta" des champs

Ainsi, le problème de l'atomisme dépasse de loin celui de l'existence des atomes de matière. Il exprime ce conflit incessant entre le discret et le continu au cœur du problème de l'identité des choses. Après trente siècles de discussions sur la réalité des atomes, au moment où l'atome se manifeste enfin dans son mouvement (Mouvement brownien) et dans sa présence spatiale (Microscopie électronique et holographie*, Diffraction* des rayons X et des électrons, Microscopie par effet tunnel*, Microscopie à force atomique), au point que nous prétendons "voir les atomes", l'atome s'entoure à nouveau du mystère de son existence. On assiste à une réoccultation de la révélation, comme si toute image ne pouvait se passer de l'ombre. L'atome de la fin du XX ème siècle est un atome habillé de la présence de phénomènes continus que l'on soupçonne de participer profondément à sa nature. Une onde fantôme, l'onde de de Broglie, que l'on n'observe pas mais dont on croît reconnaître les effets (Optique atomique* et interférences atomiques). Des phénomènes de fluctuation du champ électromagnétique dans le "vide" entourant l'atome, dont on observe les effets dans le comportement de l'atome.

Un atome quantique est né. L'atome classique des chimistes ou des cristallographes ne s'y raccorde que laborieusement. Mais si nous "voyons" aujourd'hui cet atome classique, c'est grâce aux propriétés de l'atome quantique. Si nous voyons les atomes c'est grâce à l'onde de de Broglie que précisément nous ne voyons pas. Pour les atomistes grecs et leurs émules, il y'avait les atomes et le vide. Aujourd'hui le vide se trouve partout, au coeur même des atomes. L'atome émerge du vide comme une entité stable au sein d'un univers turbulent.

S'il semblait aller de soi que l'atomisme explique l'ordre du monde, le fait qu'il soit aussi lié au désordre dans l'univers peut à première vue apparaître comme une surprise. Et pourtant il n'y a pas là une nouveauté, puisque tous les atomistes ont considéré le mouvement des atomes au hasard*, imaginant même pouvoir justifier ainsi une pluralité des mondes. La surprise est dans une modification du calcul des probabilités en physique quantique (Cf. Atomisme et hasard*).

Dès le XIX ème siècle, à l'atomisme structural des chimistes se juxtapose l'atomisme dynamique des physiciens qui développent la théorie cinétique des gaz et la mécanique statistique. D'un côté

l'explication atomique de la structure moléculaire, doctrine de l'ordonnement des édifices moléculaires et cristallins, monument de la chimie moderne, édifié par des générations de chimistes, où l'on peut distinguer les noms de l'allemand Auguste Kékulé* et du russe Dimitri Mendéléev*. De l'autre, l'explication atomique des propriétés des gaz et les tentatives de justification par des modèles atomiques des lois de la thermodynamique.

Entrée en force des phénomènes désordonnés et du hasard dans la physique sous la poussée de deux géants: John Clerk Maxwell* et Ludwig Boltzmann*. Entre atomisme et hasard, un mariage fécond qui n'a cessé de porter ses fruits (Cf. Mouvement brownien* ; Billard*)

Là où l'atomisme semblait permettre de coaguler le monde, le hasard s'introduit pour dissoudre le monde. Eternelle fuite du globule de Mercure.

ATOMISME LOGIQUE

ATTRACTEUR

Ensemble invariant de trajectoires dans l'espace de phase* d'un système dynamique* dissipatif* vers lequel tendent asymptotiquement toutes les trajectoires voisines. Quelles que soient les conditions initiales au voisinage d'un attracteur toutes les trajectoires se dirigent vers l'attracteur, qui est donc responsable d'une équifinalité*. Les trajectoires de l'attracteur correspondent à des régimes dynamiques stationnaires et les trajectoires qui se dirigent vers l'attracteur sont des régimes transitoires.

Les exemples les plus simples d'attracteurs sont constitués par le point d'équilibre ou par le cycle limite* de Poincaré qui correspond à un mouvement périodique.

La structure des attracteurs peut être extrêmement complexe comme c'est le cas des attracteurs étranges* dans des systèmes chaotiques dissipatifs.

L'existence d'attracteurs est une des propriétés les plus importantes d'un système dynamique* car elle conditionne à elle seule tout le destin du système. Leur mise en évidence dans des systèmes complexes reste un problème rarement résolu.

Il est probable que bien des systèmes complexes possèdent des attracteurs dans des sous espaces de faible dimension, et que ces attracteurs sont responsables de l'apparition dans ces systèmes de formes stables remarquables.

ATTRACTEUR ETRANGE

Attracteur* sur lequel le mouvement est chaotique*.

En fait attracteur de structure topologique complexe pouvant être du type fractal*.

L'attracteur de Lorenz* est à la fois chaotique et fractal.

ATTRACTEUR DE LORENZ

L'attracteur de Lorenz est un attracteur étrange* vedette de la dynamique non linéaire par son aspect en double lobe sur lequel se produit le mouvement chaotique, laissant penser à un ordre dans le chaos.

L'attracteur de Lorenz date de 1963 lorsque le météorologiste Edward Lorenz produit l'analyse d'un système simple de trois équations différentielles couplées extraites d'un modèle de convection atmosphérique. Il fit ressortir des aspects surprenants des solutions de ce système d'équations. En particulier elles sont sensibles aux conditions initiales, ce qui signifie qu'une toute petite différence dans celles-ci s'amplifie exponentiellement avec le temps. Ce type d'imprédictibilité est caractéristique du chaos. Mais parallèlement apparaît une figure manifestation d'ordre : les solutions numériques des équations sont des courbes qui s'enroulent et se réenroulent autour d'une curieuse figure à deux lobes, nommée par la suite attracteur de Lorenz. L'instabilité des trajectoires de phase sur l'attracteur de Lorenz s'accompagnait d'une structure géométrique particulière, celle d'un fractal*.

Pendant près de quarante ans il fut impossible de prouver que les solutions exactes des équations de Lorenz ressembleraient à ces solutions engendrées à l'aide d'approximations numériques tant par leur aspect géométrique que par leur caractère chaotique. L'attracteur de Lorenz demeurait un objet étrange et médiatique produit d'une analyse numérique, dont les résultats peuvent souvent être trompeurs. Ce n'est qu'en 1999 que Warwick Tucker réussit à prouver rigoureusement l'existence de l'attracteur de Lorenz. Résultat phare dans le domaine des systèmes dissipatifs où les résultats rigoureux manquent cruellement.

La résolution exacte d'équations différentielles non linéaires n'étant en général pas possible on a recours à l'intégration numérique qui en découpant le temps d'intégration en intervalles aussi petits que l'on veut approche les trajectoires solutions par des lignes brisées. Mais ce faisant on commet deux séries cumulatives d'erreurs : les erreurs de méthode relatives au degré d'approximation du schéma numérique choisi et les erreurs de troncature dues à l'approximation des nombres réels par les nombres en virgule flottante* utilisés par les ordinateurs. On affronte alors un terrible paradoxe ; peut on décrire une dynamique chaotique, extrêmement sensible aux conditions initiales, par des solutions calculées approximativement, dont on ne maîtrise pas réellement les conditions initiales ? On ne s'étonnera donc pas que les détracteurs de Lorenz ne voient initialement dans son aile de papillon qu'un artéfact numérique. Cet attracteur ne sortira véritablement de l'oubli qu'en 1971 lorsque Ruelle et Takens montrèrent par d'autres arguments qu'il pouvait expliquer l'apparition de régimes turbulents en mécanique des fluides.

Réputé à tort être la découverte du chaos déterministe. L'attracteur de Lorenz a joué un rôle déterminant dans l'acceptation de ce nouveau concept. C'est un des tous premiers exemples de l'existence du chaos dans les systèmes physiques réels et non pas dans des objets mathématiques ad hoc comme la transformation du boulanger*

ATTRIBUT

Attribut, propriété*, qualité*, caractère, sont des termes qui ont pour fonction de désigner ce qui doit être attaché à un objet* ou une substance* pour en marquer la réalité* ou l'identité*. Plus généralement ce que le discours déclare appartenir à un sujet. Sans attributs l'objet n'existe pas ou ne se pense pas.

Aristote* distinguait clairement l'attribut de l'accident*, faisant de l'attribut une caractéristique nécessaire de la chose. Descartes* voyait dans l'attribut la propriété essentielle de la substance* ; il considérait l'étendue* comme l'attribut de la substance corporelle et la pensée comme l'attribut de la substance spirituelle. Spinoza* considérait l'étendue et la pensée comme les attributs d'une substance unique. Les matérialistes*, et à leur suite des générations de physiciens considèrent l'étendue* et le mouvement* comme les attributs de la matière*.

Le rapport qui existe entre un objet et ses attributs est l'un des problèmes les plus anciens de la philosophie et de la métaphysique*. Le débat porte sur l'indépendance (ou la séparation) entre l'attribut et l'objet. C'est le cœur de l'opposition entre la théorie des Formes* de Platon* et la conception hylémorphique* d'Aristote*, ouvrant sur la polémique entre Réalisme*, Nominalisme* et Conceptualisme*. C'est un des aspects de l'opposition entre immanence* et transcendance*.

On peut, nonobstant l'étymologie, envisager de distinguer l'attribut en tant que caractéristique ontologique de l'objet, de la propriété* comme caractéristique phénoménale ou manifestation en présence d'un objet extérieur (un observateur par exemple). L'attribut est un invariant alors que la propriété est contextuelle*. En fait tout attribut est aussi contextuel, mais dans des circonstances où le contexte importe peu au point que l'on peut l'ignorer. La distinction entre attributs et propriétés n'est autre que la distinction historique entre qualités* primaires et qualités* secondaires. On parle aussi de propriétés attributives et de propriétés contextuelles.

Tous les attributs se manifestent comme propriétés, mais toutes les propriétés ne sont pas des attributs. Que l'eau dissolve le sucre est plus une propriété qu'un attribut. De ce point de vue la physique classique munit les objets d'attributs, tout en considérant leurs propriétés de réponse*, alors que la physique quantique ne connaît en général sous le nom d'observables* que des propriétés révélées par des mesures. Les observables* de la mécanique quantique sont des propriétés* et non pas des attributs. Ces observables sont éminemment contextuelles. Les seuls attributs que connaît la physique quantique sont du type, masse, charge, spin, c'est à dire des attributs caractérisant la nature des particules élémentaires. L'attribut ayant une fonction explicative* essentielle, l'absence d'attributs liés au comportement microphysique est la raison fondamentale des interrogations, des discussions et des polémiques sur la signification de la Mécanique Quantique*.

Le Vide* en général pourrait être envisagé comme la conséquence d'une absence d'attributs, mais certainement pas d'une absence de propriétés*. Cependant ne pas avoir d'attribut est aussi un attribut. Vide est un attribut.

A propos du Vide* se pose d'ailleurs la question générale liée au caractère universel ou particulier des attributs. Y a-t-il un seul Vide ou autant de vides que de situations physiques particulières. Le Vide est il un universel* ou un trope*

AUTO ASSEMBLAGE

L'auto assemblage est la formation de systèmes matériels complexes spontanément de par les propriétés et la nature d'un ensemble de parties préexistantes. Les formes* ainsi obtenues sont des combinaisons des formes primitives et dépendent donc spécifiquement du substrat. Il s'agit là d'un des points de vue sur la morphogénèse, le point de vue platonicien. Une conception où la diversité de la nature proviendrait de l'assemblage de formes simples données par avance. Une conception atomistique* du monde. La vision atomique et moléculaire du monde ne procède pas autrement aujourd'hui. L'auto assemblage domine en chimie* et en cristallographie*. On distingue l'auto assemblage de l'auto organisation.

AUTO CATALYSE

Une réaction auto-catalytique est une réaction chimique où l'un des produits est aussi un catalyseur de la réaction. Les équations cinétiques des réactions auto-catalytiques sont fondamentalement non-linéaires.

Une des réactions auto catalytiques les plus connues est l'oxydation de l'acide oxalique par le permanganate de potassium qui libère des ions manganèse catalyseurs de la réaction.

Cette non linéarité peut conduire à l'apparition spontanée de phénomène d'ordre. C'est ce qui fait l'importance des réactions auto catalytiques sièges de phénomènes d'auto organisation. La réaction de Belousov-Zhabotinsky* est un exemple de réaction chimique oscillante.

AUTOCORRELATION

Corrélation* des parties d'un objet entre elles. L'autocorrélation exprime la solidarité causale des différentes parties d'un objet.

AUTOCORRELATION (FONCTION D')

Fonction de corrélation* d'une fonction aléatoire avec elle-même. Pour un processus aléatoire stationnaire c'est une fonction de l'intervalle de temps, qui peut être aussi définie comme la moyenne temporelle du produit d'une réalisation du processus en des temps séparés par un même intervalle. L'équivalence de ces deux définitions est au cœur du problème ergodique*.

Cette seconde définition comme moyenne temporelle peut s'appliquer à une fonction quelconque, et l'on peut s'intéresser au comportement de cette fonction d'auto corrélation lorsque l'intervalle de temps tend vers l'infini. Si dans ces conditions la fonction d'auto

corrélation tend vers zéro la fonction correspondante a des propriétés particulières de perte de mémoire, c'est une fonction pseudo-aléatoire*.

La transformée de Fourier* de la fonction d'auto corrélation d'un processus aléatoire stationnaire définit le spectre* d'énergie ou de puissance moyenne de ce processus.

AUTOMATE

Du grec avtomatos, qui agit par lui même.

Dispositif qui sans la participation directe de l'homme effectue des processus de réception, de transformation et d'utilisation de l'énergie*, de la matière* ou de l'information* selon un programme* qui y est attaché. L'emploi d'automates augmente le rendement des opérations en confiant à l'informatique le soin de contrôler toutes les opérations. Les exemples classiques d'automates sont l'ordinateur*, la machine outil à commande numérique, les dispositifs de contrôle utilisés dans les entreprises cosmiques.

On désigne aussi sous le nom d'automate (mathématique*) un des concept essentiel de la cybernétique, modèle mathématique de systèmes existant réellement ou pouvant exister, pour la réception et la transformation en temps fini d'une information discrète.

AUTOMATE CELLULAIRE

L'automate cellulaire est un modèle de système dynamique* discret.

Il consiste en une grille régulière de cellules dont chacune se trouve à un instant donné dans un état* faisant partie d'un ensemble discret d'états. Le temps est également discrétisé et à chaque instant l'état de chaque cellule est fonction de l'état des cellules au temps précédent dans un certain nombre de cellules voisines. C'est cette dépendance du voisinage pour l'évolution, appliquée à toutes les cellules de la grille, qui fait la spécificité du modèle, qui malgré la simplicité de sa définition peut exhiber des comportements extrêmement complexes.

La complexité du comportement des automates cellulaires, induit par des règles élémentaires, peut laisser croire que l'on a là non seulement des simulacres* de phénomènes complexes mais de véritables simulations* à caractère explicatif. Il y a là de véritables phénomènes d'auto organisation*. C'est l'idéologie développée par Stephen Wolfram dans un volumineux ouvrage paru en 2002 : « A new

kind of science », sans pour autant formuler une théorie générale de la physique basée sur les automates cellulaires.

Les automates cellulaires sont un outil très populaire de modélisation de formes complexes, utilisé en mathématiques, théorie du calcul*, en biologie théorique* et en art*.

AUTOMATE MATHEMATIQUE

L'automate mathématique est la structure commune à tout système qui opérant dans le temps change d'état* interne en recevant des signaux par un canal d'entrée et en émettant des signaux par un canal de sortie. La nature des états et des signaux est quelconque.

L'automate est dit fini si les états et les signaux sont en nombres finis. On peut alors les considérer comme des symboles (lettres) formant un alphabet : alphabet des états, alphabet d'entrée et alphabet de sortie.

La définition de l'automate nécessite en plus de la donnée de l'ensemble des états, de l'ensemble des entrées et de l'ensemble des sorties, la donnée de la fonction de transfert qui à une entrée donnée et un état donné fait correspondre un autre état, et une fonction de sortie qui à ce même état et cette même entrée fait correspondre une sortie. Ces deux fonctions définissent le fonctionnement de l'automate au cours du temps.

L'automate mathématique est un automate abstrait qui représente l'aspect purement logique des automates* concrets.

Une boîte noire* est un automate mathématique.

AUTOMATISATION

Application de dispositifs automatiques (automates*) pour remplir la fonction de contrôle.

AUTOMORPHISME

AUTONOMIE

Propriété d'un système d'être régi par ses propres lois.

Le paradoxe de l'autonomie est d'exiger que le système ne soit pas isolé mais ouvert. C'est ce qui se produit dans l'auto-organisation*. L'autonomie s'acquiert aux dépens de l'environnement.

Une telle conception de l'autonomie cherche à se constituer dans la culture contemporaine. Il ne faut pas perdre de vue que la mise en place du concept d'autooscillations* par Andronov* dans les années 30

et les travaux de Turing* sur la morphogénèse* participent de ce mouvement d'idées. Mais avant les années 50 seuls les radioélectriciens connaissaient les autooscillations. En 1956, P. Vendryes dans son livre « *Determinisme et autonomie* » ne connaît ni Andronov, ni Turing, tout en soulignant déjà que l'autonomie est un des caractères fondamentaux du vivant. La science des systèmes autonomes ne va prendre un réel essor que dans les années 80, gonflée par les conceptions très médiatisées de Prigogine* (les structures dissipatives*) et de Maturana et Varela (la théorie de l'autopoïèse*).

AUTO ONDULATIONS

Les auto ondulations sont l'analogie pour les systèmes distribués* des auto-oscillations* pour les systèmes concentrés*. Ce sont des ondes obtenues par propagation d'un mouvement autooscillant. Ce sont des ondes autoentretenues dans des milieux actifs distribués, contenant des sources d'énergie. Comme pour les auto oscillations* le caractère du mouvement dépend des propriétés du système et ne dépend pas des conditions initiales ou des conditions aux limites. Dans les cas les plus simples les auto ondulations sont les solutions d'une équation aux dérivées partielles non linéaire comportant un terme non linéaire caractérisant les sources ponctuelles d'énergie dans le système et un terme de diffusion* (équation de réaction diffusion*)

L'exemple d'un milieu chimiquement actif est donné par une mince couche de solution aqueuse dans laquelle se produit la réaction auto oscillante* de Belousov-Zhabotinsky*.

On relie souvent les auto ondulations aux distributions stationnaires ordonnées, dites structures dissipatives*, prenant naissance dans les milieux actifs sièges de phénomènes de diffusion. Les auto ondulations jouent un rôle important dans la morphogénèse*.

AUTO ORGANISATION

L'auto-organisation est le processus par lequel un système physique gagne de l'organisation* sans que celle-ci soit due à une action extérieure « organisée » ou à un dessein intelligent*. Voilà là une propriété contre intuitive mais que la réalité physique impose.

Dans le cas le plus général c'est un processus par lequel un système ouvert* (non isolé*) voit s'accroître son organisation* en ne recevant de l'extérieur que des signaux non organisés (flux d'énergie thermique par exemple). On dit alors en général que le système présente des propriétés émergentes*.

Un système autoorganisé est un système non linéaire ouvert loin de l'équilibre, siège de comportement coopératif de ses parties.

Le terme d'auto organisation désigne l'émergence spontanée et dynamique d'une structure temporelle, spatiale ou spatio-temporelle sous l'effet conjoint d'un apport extérieur d'énergie et des interactions à l'œuvre entre les éléments du système.

Dans les systèmes ouverts parcourus par des flux de matière, d'énergie ou de charges, les formes observées s'expliquent par la dynamique sous-jacente dont elles sont les états stationnaires*.

L'auto-organisation est un processus universel d'apparition des formes. Découvert d'abord en physique, puis en chimie, il joue un rôle central en biologie, et apparaît de plus en plus souvent dans l'explication de phénomènes anthropologiques, sociaux et économiques. Ce terme regroupe de nombreux phénomènes dont on ne peut affirmer la communauté de mécanismes.

L'auto organisation est responsable de l'apparition de nombreuses structures spatiales dans les systèmes thermodynamiques loin de l'équilibre (structures dissipatives*), comme lors de la turbulence* et de la convection dans les fluides (ex. les rouleaux de Bénard*). Les conditions générales de l'auto organisation dans un système sont l'ouverture du système au flux de matière et d'énergie, son fonctionnement loin de l'équilibre et sa non linéarité dans les relations entre les flux et les forces, ce qui implique un couplage fort entre les processus.

C'est la compréhension des phénomènes d'auto oscillations*, comme auto-organisation temporelle, qui a révélé la nature profonde de l'auto organisation et ouvert la voie au développement de la théorie des systèmes dynamiques* non-linéaires*. C'est là l'œuvre de l'Ecole d'Andronov* à partir de 1928.

L'auto-organisation est une propriété inattendue et contre intuitive, si l'on croit qu'un système abandonné à lui même tend à se désorganiser, et que l'ordre provient d'une intervention extérieure, une intelligence humaine ou divine. Les doctrines de l'auto-organisation reposent sur l'exploitation des propriétés des systèmes non linéaires, tout en utilisant souvent des idées assez vagues sur l'organisation*, la forme* ou l'ordre*. Mais l'ordre y apparaît forcément grâce à une augmentation de l'entropie* du milieu extérieur

par le biais de phénomènes dissipatifs*. On a souligné pour l'auto-organisation l'importance des rétroactions*, des non linéarités et du caractère ouvert et hors d'équilibre des systèmes pour qu'il y apparaisse des formes stables et reproductibles sans plan d'ensemble ni prescription extérieure.

Le terme d'auto-organisation semble avoir été introduit par le cybernéticien W. Ross Ashby, mais ne s'est répandu que dans les années 70 lors de l'explosion de l'étude des systèmes dynamiques* non linéaires initiée par les mathématiciens soviétiques. Il a été popularisé par les travaux de l'école de Bruxelles (Prigogine) et par les considérations de la synergetique*.

On peut considérer l'auto-organisation comme une adaptation à des contraintes extérieures peu spécifiques et désordonnées (aléatoires même), fondée sur les propriétés intrinsèques du système. Cette adaptation munit la forme* de propriétés de stabilité particulières. La forme* constitue une stabilité des choses face à la contingence du réel. La production de formes par la morphogenèse biologique* est le signe indubitable de la stabilité des organismes vivants. Mais il ne s'agit sans doute pas de n'importe quelle stabilité. Aux yeux du grand mathématicien René Thom, il s'agit de la stabilité structurelle*.

Le phénomène d'auto-organisation est la réalisation d'un comportement cohérent d'un ensemble de sous-systèmes. Sa généralité provient de ce qu'il n'est pas déterminé par la nature des éléments en interaction mais par la structure de ces interactions. Haken* étudiant l'engendrement de rayonnement cohérent dans les lasers* fut l'un des premiers à attirer l'attention sur la généralité du phénomène et à proposer pour son étude une nouvelle discipline, la synergetique*.

Mathématiquement l'auto-organisation est liée à la présence d'attracteurs* dans le système dynamique* correspondant. Ce sont eux qui expliquent la possibilité de voir s'installer l'auto-organisation dans des objets mathématiques comme les automates cellulaires*, ouvrant la voie à la simulation* de nombreux phénomènes physiques.

AUTO ORGANISATION EN BIOLOGIE

Dans les systèmes ouverts, parcourus par des flux de matière, d'énergie ou de charges, les formes observées s'expliquent par la dynamique sous-jacente, dont elles sont des états stationnaires*. Ce point de vue dynamique relie naturellement la notion de forme* à celle d'auto-organisation*. Ce terme désigne le fait qu'un équilibre dynamique s'établit spontanément et que l'assemblage des différents éléments par le biais d'échanges, d'interactions de couplages divers

conduit à un résultat inédit peu prévisible à priori à partir des composants.

Se pose alors la question de la stabilité* de cet assemblage, c.a.d la sensibilité aux conditions initiales et la sensibilité aux variations des paramètres, soit la stabilité structurelle*. Cette étude est indispensable pour évaluer la robustesse des phénomènes observés et déterminer s'ils sont la règle ou l'exception. On peut aussi s'intéresser à la complexité* de la structure auto organisée par exemple à des fins de comparaison ou de classification. C'est la dynamique sous jacente qui doit être étudiée et non la structure finale. Dans ce cadre la morphogénèse* apparaît comme un phénomène régi tout à la fois par l'information génétique* qui contrôle les éléments constitutifs, et par les caractéristiques du métabolisme* qui contrôlent les flux de matière.

Une grande similitude émerge entre les formes spatiales ou spatio-temporelles apparaissant à l'intérieur d'une cellule (cytosquelette, fuseau mitotique, centrosome, réseau de protéines, autooscillateurs* biochimiques) dans un assemblage de cellules (réseau de neurones*, système immunitaire*, chimiotactisme*, vision « hasard –sélection » de la différenciation cellulaire et de l'embryogénèse, phyllotaxie*, rythmes cardiaques) et à une échelle très supérieure dans les écosystèmes*(système prédateur-proie, métapopulations). Cette similitude reflète simplement la robustesse et l'universalité des principes à l'œuvre dans les structures auto-organisées. En effet ce sont les schéma relationnels, soit la façon dont les éléments sont couplés et dont se fait la répartition des flux qui sont déterminants, et non la nature concrète de ces couplages et de ces flux.

Ainsi les formes observées dans les organismes vivants sont des structures stationnaires, dites hors d'équilibre, au sens où elles résultent d'un équilibre dynamique entre flux entrants et flux sortants. Leur compréhension nécessite une approche globale à la fois dans le temps et dans l'espace, en reliant les différentes échelles* caractéristiques du système. En particulier, ce point de vue dynamique est nécessaire pour expliquer le passage du génotype* au phénotype* et déterminer le rôle exact des gènes dans la construction et le fonctionnement d'un organisme vivant. L'information génétique intervient basiquement, via les protéines exprimées, au niveau des interactions moléculaires (acides nucléiques*/protéines* et protéines/protéines), des réactions chimiques (catalyse enzymatique*) et des mouvements microscopiques (protéines motrices). Ce qu'il reste à décrire c'est comment cette information exprimée au niveau moléculaire va être relayée, amplifiée et stabilisée par les processus dynamiques en jeu, pour finalement se refléter dans des structures à

toutes les échelles supramoléculaires, jusqu'à celle de l'organisme tout entier.

La vie ce sont tout d'abord des processus dynamiques producteurs de formes par auto organisation.

AUTO OSCILLATIONS (Oscillations autoentretenues)

Oscillations* périodiques stables non amorties, prenant naissance dans des systèmes dynamiques*ouverts* non linéaires* dissipatifs* avec rétroaction* sur la source d'énergie, en l'absence de toute action périodique extérieure. Leur fréquence n'est pas imposé de l'extérieur mais est caractéristique du système.

Ces oscillations correspondent à un cycle limite* de Poincaré et ne dépendent donc pas des conditions initiales. Cet ordre correspond à une diminution d'entropie* compensée par une augmentation de celle du milieu environnant grâce au phénomène de dissipation*.

Nous vivons dans un univers d'auto oscillateurs. En fait la théorie des auto oscillations selon Andronov* constitue un paradigme fondateur pour l'auto-organisation*, dans le cas particulier des formes périodiques. Les auto-oscillateurs sont responsables de la plupart des phénomènes temporels périodiques observés ou créés. Un émetteur radio (générateur électrique d'ondes électromagnétiques), comme l'oscillateur de Van der Pol*, une horloge* ou un laser*(générateur quantique d'ondes électromagnétiques) sont des systèmes auto-oscillants typiques, comme le sont des systèmes chimiques (Réaction de Belousov-Zhabotinsky*) ou des systèmes biologiques comme le cœur ou les rythmes de la production hormonale (Cf. Rythmes biologiques*). Les instruments de musique* à corde frottée ou à vent sont des auto-oscillateurs, et les sons qu'ils produisent sont totalement structurés par les propriétés physiques de tels systèmes.

Les auto-oscillateurs sont en fait comme la plupart des systèmes auto-organisés des systèmes non-linéaires ouverts avec entrée d'énergie (ou de matière) et dissipation d'énergie (ou de matière) avec rétroaction sur l'entrée. C'est la dissipation qui régularise la rétroaction. Le débit de la source d'énergie est commandé par l'état du système, ce qui est le principe même de la rétroaction. L'énergie dissipée en chaleur par le système est le prix acquitté pour le fonctionnement de la rétroaction, c'est le prix de la stabilité.

Les auto-oscillations sont le paradigme* même de l'émergence* et de l'auto-organisation* des structures dissipatives*.

AUTO OSCILLATIONS CHAOTIQUES

AUTOPOIESE

L'autopoièse (en grec autocréation) est un processus autoréférentiel* produisant des éléments qui sont nécessaires à leur propre production. C'est un concept concernant les systèmes qui se maintiennent eux mêmes, en particulier les systèmes biologiques*, et une théorie épistémologique de la cognition et de l'auto référence. Il participe de la constitution de la notion de système autonome*.

Humberto Maturana et F.J. Varela ont proposé le concept d'autopoièse (opposé à celui d'allopoièse) comme celui qui reflète l'organisation de la matière vivante, qui maintient son unité au sein d'un turnover incessant des constituants, en produisant les conditions de renouvellement de ceux ci. L'autopoièse est pour eux la condition nécessaire et suffisante de l'existence minimale de la vie.

L'autopoièse est un mécanisme auto catalytique*, c'est à dire une organisation circulaire qui assure la production des composants qui la constitue de manière à ce que le produit de leur activité est l'organisation* même qui préside à leur production.

L'autopoièse est un cas particulier d'auto organisation* d'un système ouvert, structurellement couplé au milieu extérieur. Un système autopoiétique est donc opérationnellement fermé et structurellement ouvert. C'est à la fois un mécanisme* et un organisme*.

Il semblerait que certaines doctrines cosmologiques* de création continues d'univers fasse appel à des processus autopoiétiques.

AUTOREGULATION

AUTOREFERENCE

Le fait pour certaines phrases ou certaines expressions de faire référence à elles mêmes. Ce qui correspond au fait général d'être à la fois argument et fonction*. Le fait pour un sujet de faire référence à lui-même. Dans certains cas ceci ne pose pas de problèmes alors que dans d'autres cela conduit à des paradoxes* (antinomie*du menteur). Tarski* dans sa distinction entre langue-objet et métalangue et dans sa théorie sémantique de la vérité* a tenté d'expliquer cette dichotomie.

L'autoréférence est l'aptitude à se considérer à la fois comme sujet et comme objet. Elle est la capacité de se référer à soi tout en se référant à ce qui n'est pas soi. L'autoréférence n'isole pas, elle marque une identité* en instituant une autonomie*.

L'autoréférence est une situation d'une grande généralité en linguistique, en philosophie, en mathématiques et en programmation informatique. L'autoréférence est un des grands thèmes de la culture non linéaire*. Il a acquis une certaine popularité à travers un livre à succès comme « *Gödel, Escher, Bach, les brins d'une guirlande éternelle* » de Douglas Hofstadter. Ce livre examine quel rapport y a-t-il entre la musique de Jean-Sébastien Bach, les dessins du graveur néerlandais Maurits Escher, et le célèbre théorème du logicien autrichien Kurt Gödel ? Du premier, on connaît des pièces lisibles indifféremment dans les deux sens, ou répétant le même motif sous des formes toujours nouvelles ; Escher lui, nous a laissé des images paradoxales de fontaines s'alimentant elles-mêmes, de bandes de Möbius infinies ou de mains s'autodessinant. De Gödel enfin, vient cet étrange théorème posant une limite à la capacité des mathématiques à démontrer leurs propres théorèmes. "Autoréférence" est ainsi le maître mot d'un récit fleuve, devenu livre-culte, d'une totale liberté d'écriture et de ton. De dialogues en chansons, de Lewis Carroll à Magritte, et de la biologie moléculaire à l'intelligence artificielle, l'auteur démonte les rouages logiques sur lesquels reposent toutes les sciences actuelles. Hofstadter introduit le terme de « boucle étrange » pour désigner des systèmes où lorsque l'on se déplace selon de niveaux hiérarchiques on revient au niveau initial. Hofstadter donne comme exemple de boucles étranges, de nombreuses œuvres de Escher, le flot d'information entre l'A.D.N. et les enzymes à travers la réplication de l'A.D.N. et la synthèse des protéines, et les propositions indécidables envisagées par Gödel.

L'autoréférence a de nombreux avatars : la récursivité*, le champ propre*, l'autocatalyse*, l'autopoïèse*, l'auto organisation*, l'autotélisme, l'autosimilarité* et les fractals*. L'autoréférence est une conception voisine de la rétroaction*, mais relève plutôt de la réaction* lorsque la boucle réagit directement sur le système et non pas sur ses entrées.

AUTOSIMILARITE

AUTOTELISME

L'autotélisme décrit une situation où l'activité d'un système n'a d'autre finalité* que lui-même. Une dynamique autoréférentielle.

AVATAR

AVOGADRO (NOMBRE D')

Nombre de molécules dans une mole de matière. La mole est la quantité de matière en grammes égale à la masse moléculaire (atomique) définie comme la somme des numéros atomiques* des constituants. Ainsi une mole d'eau OH_2 est égale à $16+2=18$ grammes.

C'est une constante universelle*, valable pour toute matière égale à $6,0220943 \cdot 10^{23}$ par mole.

AXIOMATIQUE

La méthode axiomatique consiste à construire un domaine scientifique en choisissant un ensemble fini d'affirmations ou d'énoncés comme éléments de départ- les axiomes*- à partir desquels par les voies de la logique formelle* on déduit toutes les autres propositions vraies-théorèmes- du domaine. Le système d'axiomes doit être exempt de contradictions*, aucun axiome ne peut être déduit d'autres axiomes, les axiomes sont nécessaires et suffisants pour la déduction de tous les théorèmes

On choisit un ensemble de termes et de symboles de départ correspondant à un certain nombre d'objets sélectionnés pour exprimer le domaine. Ainsi Euclide qui utilisait la méthode axiomatique dans ses « Eléments » utilisait comme termes premiers le point, la droite et le plan. L'axiomatique de la géométrie euclidienne adoptée aujourd'hui, celle de Hilbert*, part de six termes premiers : le point, la droite, le plan, l'incidence (être contenu dans), l'ordre (se trouver entre) et la congruence (égalité géométrique). En logique formelle* on peut avec Frege* construire le calcul des propositions* avec les signes fondamentaux de négation, d'implication et de parenthèses. A l'aide des termes fondamentaux on formule un certain nombre d'axiomes*.

Ainsi Peano (1889) a formulé l'arithmétique des nombres naturels à l'aide de cinq axiomes. Il existe différentes formulations axiomatiques du calcul des propositions*. Celle de Hilbert* comporte quatre axiomes.

La nécessité d'une axiomatisation des mathématiques d'abord, puis de la physique prend sa source au milieu du XIX^{ème} siècle lorsque l'édification de la géométrie non-euclidienne* par Gauss*, Lobatchevsky* et Bolyai* a obligé d'abandonner les prétentions à la vérité absolue de la géométrie euclidienne. Dès lors les axiomes mathématiques n'apparaissent plus comme évidents, mais comme des hypothèses dont il faut vérifier que les conséquences sont adaptées à la représentation du monde. Il apparaît que l'on peut remplacer le

cinquième Postulat d'Euclide sur les parallèles qui semblait la seule vérité objective, par sa négation, et cependant développer logiquement une théorie géométrique à contenu tout aussi cohérent et riche que la géométrie d'Euclide.

Dans sa dissertation inaugurale *Des hypothèses qui servent de fondement à la géométrie* (1867) l'ambition de Riemann* est de fournir un cadre mathématique général aux divers phénomènes naturels. En 1899 Hilbert* publie ses *Grundlagen der Geometrie* où il procède à une axiomatisation de la géométrie euclidienne. Cet ouvrage devient aussitôt célèbre et se constitue en charte de l'axiomatisation. Non content de procurer un système complet d'axiomes valides pour la géométrie euclidienne, Hilbert classe ces axiomes en divers groupes de nature différente et s'attache à déterminer la portée exacte de chacun d'entre eux. Les géométries non euclidiennes de Lobatchevsky* et de Riemann* se présentent alors comme des cas particuliers résultant de la suppression ou de la modification de tel ou tel axiome. Il souligne par là la liberté dont dispose le mathématicien dans le choix de ses hypothèses. Ce point de vue sera adopté de façon à peu près unanime par les mathématiciens et se développera tout au long de la première moitié du siècle, en particulier lors des tentatives de la théorie axiomatique des ensembles* pour résoudre la crise de fondements en mathématiques*.

L'œuvre de Bourbaki* en constituera une illustration majeure, mais l'œuvre de Gödel* marquera un coup d'arrêt à cette tendance générale.

La méthode axiomatique qui semble souvent porter tous les espoirs des formalisateurs a subi en 1931 un coup d'arrêt certain lorsque Gödel* a démontré ses théorèmes (théorèmes d'incomplétude de Gödel*) sur l'incomplétude des systèmes formels, où l'on peut construire des formules qui ne sont pas démontrables dans le système.

L'esprit d'axiomatisation défendu par Hilbert porte en lui les deux événements mathématiques de la seconde moitié du XIX^e siècle. Le développement de théories axiomatiques de la géométrie accompagnant la formulation de géométries non euclidiennes a bouleversé la millénaire axiomatisation d'Euclide*. Le développement d'une logique mathématique*, une logique des relations, crée un appareil mathématique de la logique qu'Aristote* et ses continuateurs médiévaux ne soupçonnaient pas, mais dont avait rêvé Leibniz*. Là aussi il y a en fait axiomatisation de la logique. Un mariage entre Aristote et Euclide. La dot commune de ce mariage c'est la perte de signification de l'objet au profit d'une signification des relations entre objets. Ainsi Hilbert déclarait dans ses « Fondements de la géométrie »

que bien que les termes utilisés fussent « point », « droite », « plan », il pourrait s'agir tout aussi bien de bière, de chaise ou de n'importe quel autre objet, pourvu seulement qu'ils obéissent aux axiomes. L'axiomatisation évacue le sens précis des objets, et produit une structure* générale. Un univers du sans objet où ne règnent que les interactions, exemplifié par la télégraphie sans fil naissante. Un univers où la peinture abstraite va s'engouffrer, symbolisant un esprit qui dominera tout le XX^e siècle.

AXIOMATIQUE EN PHYSIQUE

Hilbert* pousse plus loin sa réflexion sur l'axiomatisation en mathématiques, en prétendant axiomatiser l'ensemble de la physique. C'est son fameux sixième problème, énoncé au Congrès international de mathématiques tenu, à Paris en 1900.

« Les recherches sur les fondements de la géométrie suggèrent le problème : traiter de la même manière, à l'aide d'axiomes, les sciences physiques où les mathématiques jouent un rôle important ; au premier rang on trouve la théorie des probabilités et la mécanique »

En 1915 il publie *Grundlagen der Physik*, où il fournit les bonnes équations de la relativité générale d'Einstein.

L'esprit d'axiomatisation fut soutenu au cours du siècle par le positivisme logique*, en particulier Carnap*, et par le structuralisme*.

En 1909 Carathéodory* publia un travail de pionnier en formulant les lois de la thermodynamique de manière axiomatique, en n'utilisant que des concepts mécaniques et la théorie des formes différentielles de Pfaff. Il exprimait ainsi la seconde loi de la thermodynamique : « au voisinage de tout état il y a des états que l'on ne peut approcher de près par des changements d'état adiabatiques* ».

L'esprit axiomatique règne en théorie de la relativité*. La théorie de la relativité restreinte- à l'origine conçue comme une théorie physique de l'électrodynamique, a été géométrisée par Minkowski en 1908. C'est lui qui introduisit le formalisme d'espace-temps* quadridimensionnel donnant à la relativité restreinte le caractère d'une théorie géométrique. Historiquement la relativité générale* a été construite comme une théorie géométrique de la gravitation, qui n'y est plus décrite en termes de force, mais en termes de propriétés d'un espace riemannien. Prolongeant le vœu de Hilbert, Hermann Weyl* fut le premier à tenter d'étendre la géométrie riemannienne* de façon à incorporer l'électromagnétisme et la gravitation dans un formalisme unifié. Malgré un échec partiel, sa théorie a joué un rôle essentiel dans

le développement de la géométrie différentielle* moderne et dans l'élaboration des théories de jauge*. Son approche va hanter sans résultat l'esprit des physiciens tout au long de ce siècle : traiter toutes les forces de la nature comme des manifestations de la structure d'un espace – temps.

En 1931 Kolmogorov créa un choc en fondant la théorie des probabilités* sur une démarche axiomatique. Il y définit les évènements élémentaires et les observables comme les participants à une algèbre de Boole*. C'est une approche structuraliste* des probabilités qui ne justifie pas l'origine du hasard*. L'axiomatique de Kolmogorov aura une grande influence sur les approches algébriques de la mécanique quantique* et de la théorie quantique des champs*(Cf. Structures algébriques de la physique*, Théorie quantique des champs*-Axiomatique). En fait il faut remarquer l'élaboration simultanée de deux théories axiomatiques des probabilités, la théorie de Kolmogorov et la mécanique quantique de Von Neumann (assistant de Hilbert), théorie axiomatique des probabilités quantiques* (Axiomatique quantique*). Deux théories qui viennent axiomatiser des corps de doctrine déjà largement développés, mais où régnait encore un esprit numérique et analytique.

L'axiomatisation en physique suit l'une des trois démarches essentielles : géométrique, algébrique ou topologique. Plus récemment on assiste à des tentatives d'axiomatisation à partir de la théorie de l'information*.

AXIOMATIQUE QUANTIQUE

Historiquement la mécanique quantique est née de démarches heuristiques fondées sur quelques principes fondamentaux comme la quantification* des échanges d'énergie dans la loi de Planck* ou le dualisme onde corpuscule* selon de Broglie*. Un premier appareil mathématique, la mécanique des matrices* de Heisenberg* a vu le jour sur des considérations d'observabilité.

Dirac* et von Neumann* ont élucidé la structure d'espace vectoriel de Hilbert de la théorie, soulignant le rôle qu'y joue la non compatibilité des observables*, traduite par la non commutation* des opérateurs*. D'une théorie physique ordinaire à équations et formules, la mécanique quantique change alors de statut. Sous la poussée de mathématiciens comme Von Neumann* et Hermann Weyl*, nombres

et équations perdent de leur valeur intrinsèque au profit de structures algébriques* qui incarnent le sens profond de la théorie. Comme si la théorie physique n'était là que pour exemplifier un langage formel où s'expriment les relations entre observables. Des objets abstraits occupent le devant de la scène : espace vectoriel*, espace de Hilbert*, algèbre d'opérateurs*, groupes* de transformations. Un univers de non objets pour parler des objets. La mécanique quantique se présente alors non pas comme une mécanique mais comme une axiomatique probabiliste à l'instar de l'axiomatique de Kolmogorov pour les probabilités classiques : un calcul de probabilités quantiques*.

On a par la suite cherché à déduire le formalisme de la mécanique quantique à partir d'un certain nombre d'axiomes. En particulier dans le cadre de logiques propositionnelles*, comme c'est le cas pour Jauch et Piron.

Plus récemment, la reformulation de la mécanique quantique dans le cadre de la théorie de l'information quantique* a amené à comprendre la mécanique quantique comme réfléchissant les contraintes sur la représentation théorique des processus physiques, par certains principes « d'interdiction » (opérations impossibles) sur l'acquisition, la représentation et la communication de l'information*. Il s'agit en particulier de l'interdiction du transfert superluminal d'information entre systèmes physiques par mesure sur l'un d'entre eux (pas de transfert d'information consécutif à la mesure dans un système avec enchevêtrement*) et de l'interdiction du transfert parfait de l'information contenue dans un état inconnu (non duplication* de l'état)

AXIOME

Point de départ d'un raisonnement ou hypothèse constitutive d'une théorie*. Affirmation d'une vérité* sans preuves servant de support au développement d'un formalisme* ou d'une pensée. Ainsi Leibniz* déclare « *Il n'y a rien dans l'intelligence qui ne vienne par les sens* ».

L'axiome est plus radical que le postulat* et de nature différente du principe* et de la définition*.

AXIOME DU CHOIX

BARYONS

Classe de particules élémentaires* du type hadrons*, à spin demi-entier (fermions*), constituées par trois quarks*. Le proton* et le neutron* sont des baryons.

Les baryons participent aux quatre interactions fondamentales*.

BASE (d'un espace vectoriel*)

Ensemble de vecteurs d'un espace vectoriel* permettant de représenter un vecteur quelconque sous forme de combinaison linéaire avec des coefficients numériques.

BAYES (Théorème de)

BAYESIANISME

BEAUTE (Cf. Esthétique*)

BEAUTE EN SCIENCE

La science par opposition à l'art privilégie la rationalité au dépens de l'émotion. Ce n'est pas pour autant que la beauté en est absente. L'histoire de la science fournit de nombreux exemples où des principes esthétiques ont guidés les recherches des savants. Les acteurs de la physique du XX^e siècle se sont interrogés sur le rôle de la beauté dans la construction et dans la sélection des théories. Le physicien Dirac* déclare ainsi « qu'il est plus important pour une équation d'être belle que d'être en accord avec l'expérience ».

Les critères de la beauté en science sont variés même s'ils s'appliquent souvent aux formes mathématisées de la science. Il peut s'agir de l'harmonie géométrique, de la simplicité ou de l'élégance de la formulation. Mais tout comme en esthétique* la beauté caractérise bien souvent une situation où une grande richesse de faits est présentée de manière facilement lisible. Le tableau de la classification périodique des éléments de Mendeleïev* en est un exemple frappant. La classification des formes cristallines selon 32 types de symétrie proposée par Bravais en est un autre exemple. Le symbolisme mathématique présente aussi bien souvent ce caractère qui assure à la complexité une présentation compacte la rendant intelligible et manipulable. C'est ce symbolisme qui donne aux théories unitaires leur caractère esthétique et élégant. Ainsi mises en forme à l'aide du calcul vectoriel* les équations de Maxwell* synthétisent admirablement l'unité des phénomènes électromagnétiques. Mais ce n'est qu'une étape dans la formulation

compacte de l'électromagnétisme qui utilise aujourd'hui les outils de la géométrie différentielle.

Une des sources de beauté dans la physique contemporaine est la géométrisation des théories, et des acteurs éminents de cette évolution comme Einstein*, Weyl*, Wheeler* ou Penrose* ont clairement énoncé des préoccupations esthétiques. Ainsi Penrose de déclarer que « C'est une chose mystérieuse que ce qui apparaît élégant a de meilleures chances d'être vrai que ce qui est laid ».

BEHAVIORISME

Doctrines de la psychologie prétendant ne prendre en compte que les faits du comportement des animaux et des hommes, sans chercher à "comprendre" les processus psychiques internes qui seraient responsables de ces comportements. La méthode fondamentale du béhaviorisme consiste en l'étude des stimuli et des réponses. Démarche de la boîte noire* typiquement cybernétique*.

Le behaviorisme est un réductionnisme* et un matérialisme*, une réduction du comportement humain et animal aux stimuli et aux réponses, excluant tout appel organique à la conscience. Très influent parmi les psychologues, le behaviorisme est passé de mode et a été remplacé par le modèle computationnel de la cognition (Cf. Sciences cognitives*) qui est aussi un réductionnisme matérialiste.

BELL (INEGALITES DE)

John Bell a trouvé un critère mathématique (inégalités de Bell) pour distinguer les situations à état enchevêtré* de celles à état simple produit d'un système de particules identiques indiscernables, c.a.d. des situations à corrélation à grande distance de celles hypothétiques à corrélations faiblissant avec la distance, soit d'état quantique sans variables cachées* d'un état à variables cachées.

Tous les états non-enchevêtrés vérifient une inégalité de Bell. Si l'on observe une violation d'une inégalité de Bell l'état correspondant est enchevêtré

L'expérience d'Aspect* en prouvant selon ce critère, l'existence de l'enchevêtrement*, donc de la corrélation à grande distance, est venue anéantir les espoirs mis par certains dans l'existence de variables cachées*. Révélant ainsi la réalité d'une des propriétés les plus marquantes de la mécanique quantique. Toutes les tentatives de mettre en défaut la mécanique quantique ont jusqu'à présent échouées.

Les inégalités de Bell sont en fait des inégalités du calcul des probabilités* ordinaire kolmogorovien, où la mesure ne fait que constater l'existence d'attributs préexistants, alors que le nouveau calcul de probabilité quantique*, tient compte du fait que c'est la mesure qui crée l'attribut. Elles sont un des critères permettant de trancher expérimentalement entre l'usage des deux calculs.

Les inégalités de Bell montrent qu'il existe de prédictions de la théorie quantique qui ne peuvent être obtenues par aucune théorie kolmogorovienne. L'expérience d'Aspect montrant que des systèmes de deux photons corrélés violent les inégalités de Bell, indiquent que ces systèmes ne peuvent être décrits par la théorie classique des probabilités mais le sont correctement par la M.Q., sans se prononcer sur la notion de variables cachées*. Mais si l'on remarque que toute théorie à variables cachées locales vérifie les inégalités de Bell car elle relève forcément du calcul des probabilité kolmogorovien, seules des variables cachées non-locales* peuvent reproduire les résultats de la M.Q. Certains contestent cette conclusion.

Les inégalités de Bell ont relancé le débat sur l'interprétation* de la mécanique quantique, qui s'était alors cantonné à quelques spécialistes en particulier de tendance matérialistes*, marxistes* Toute la fin de siècle a été marquée par ce débat.

BELOUSOV-ZHABOTINSKY (REACTION DE)

BENZENE

Molécule C_6H_6 . Sa structure cyclique est remarquable. Un hexagone d'atomes de carbone, chacun lié à un atome d'hydrogène. Son schéma de liaisons de valence* comporte une ambiguïté dans l'attribution des double liaisons qui alternent avec des liaisons simples. Ces doubles liaisons alternantes sont dites « conjuguées ». Ce problème qui hante la chimie est résolu par la chimie quantique* en utilisant le principe de superposition*. La structure électronique de la molécule correspond à un état quantique obtenu par l'addition des états correspondant aux différentes formules chimiques possibles (mésomérie*).

Cette situation se retrouve pour toute une classe de composés chimiques comportant des noyaux de carbone hexagonaux accolés. Ce sont les composés aromatiques, composés polycycliques à double liaisons conjuguées. Les plus simples sont le naphthalène et l'anthracène.

BETA (DECOMPOSITION)

Décomposition d'un noyau radioactif avec la production d'un électron (particule β). C'est un processus où un neutron * se transmute en un proton* avec production d'un électron* et d'un neutrino*. Ce processus est contrôlé par une interaction faible* dont c'est la première manifestation connue.

BETA (PARTICULE)

L'électron, ainsi nommé de par sa manifestation dans la décomposition beta*.

BIFURCATION

On désigne par bifurcation d'un système* dépendant d'un paramètre un changement de caractère qualitatif (modification de la stabilité d'un point fixe*, apparition d'un cycle limite*) au voisinage d'une valeur donnée du paramètre. Ce concept apparaît dans la théorie des systèmes dynamiques* pour désigner les changements qualitatifs du mouvement pour de petites variations des paramètres. Il s'agit de variations de la structure topologique de l'espace de phase*, c.à.d. de l'apparition de mouvements non topologiquement équivalents au sens de ce qu'un mouvement ne peut être ramené à l'autre par une transformation continue des coordonnées et du temps. C'est l'apparition de ces discontinuités qui caractérise la bifurcation, en lui associant une non prédictibilité source d'un comportement émergent*.

Les fondements de la théorie des bifurcations ont été posés par Poincaré* et Lyapounov*, puis développés par Andronov* et son école.

Les évènements fondamentaux de l'évolution d'un système dynamique sont souvent liés à des bifurcations par modification de paramètres, ainsi de l'apparition d'états d'équilibre ou de la naissance de régimes périodiques et du changement de leur stabilité.

BIFURCATION D'ANDRONOV-HOPF

La bifurcation d'Andronov-Hopf est une bifurcation* qui décrit la naissance d'un cycle limite* à partir d'un état d'équilibre instable.

BIG BANG

Le modèle cosmologique* dit du big-bang selon lequel l'univers est en expansion* et en refroidissement depuis une singularité intervenue il y a entre quinze et vingt milliards d'années. Proposé initialement par Georges Gamow* ce modèle prévoyait un rayonnement résiduel* fossile qui fut effectivement trouvé en 1964 apportant par là un argument observationnel de poids à la théorie, dite par dérision, du big bang.

Après cinquante années d'incrédulité générale les modèles du big bang ont aujourd'hui fait leurs preuves. Ils sont fondés sur des observations et des expérimentations qu'ils extrapolent vers un passé de plus en plus lointain, dont l'origine n'est pas accessible. Aucun autre modèle n'explique les nombreux résultats observationnels qui corroborent le big bang. Ce ne reste pourtant qu'un modèle*.

BILLARD (Cf. Système dynamique (Le point de vue du raton laveur)*)

Système dynamique* où une particule matérielle se déplace par inertie dans un domaine fermé fini, avec des frontières lisses par morceaux, sur lesquelles la particule rebondit élastiquement par réflexion (angle de réflexion égal à l'angle d'incidence), et muni d'un obstacle central, telle une boule de billard fixe.. Il s'agit d'un billard mathématique, idéalisation du billard utilisé dans le jeu, où l'on ne tient compte ni de la rotation de la boule sur elle-même ni du frottement. Le problème mathématique du billard est dans la description des types possibles de trajectoires et dans leur classement en particulier en trajectoires périodiques ou fermées et en trajectoires non périodiques.

L'évolution peut aussi être étudiée dans l'espace de phase* pour y définir des propriétés d'ergodicité* ou de mélange*. Les billards à frontières concaves (billards de Sinai), dont la frontière est incurvée partout vers l'intérieur, constituent un exemple historique de systèmes dynamiques à propriétés stochastiques (chaotiques) fortes : ce sont des K-systèmes*.

L'appareil mathématique nécessaire pour l'étude des propriétés ergodiques* des billards est apparu dans les années 1970 après une série de travaux de D.V. Anosov*, Ya.G. Sinai*, S. Smale* et d'autres, fondant une nouvelle branche de la théorie des systèmes dynamiques*

la théorie des systèmes dynamiques hyperboliques* (Cf. Dynamique non linéaire et chaos-histoire*).

Outre leur utilisation dans des problèmes purement mathématiques les billards sont intéressants comme modèles pour des processus physiques très complexes. Les billards sont traditionnellement utilisés en optique et en acoustique. Certains des modèles importants de la mécanique classique, de la physique statistique et de l'hydrodynamique peuvent être réduits à un billard-gaz et liquides faits de molécules en collisions élastiques entre elles et avec les parois (systèmes de boules dures).

Le jeu de billard est un jeu de hasard, n'en déplaise aux amateurs.

BIOCHIMIE

La biochimie est l'application de la chimie aux systèmes chimiquement organisés que sont les systèmes biologiques. Les composants chimiques y sont hautement spécifiques, bien souvent macromoléculaires, comme les protéines*, et les réactions chimiques, en général catalysées par les enzymes*, sont la plupart du temps couplées de manière hiérarchique.

Les principales catégories de molécules étudiées en biochimie sont les glucides*, les lipides*, les protéines* et les acides nucléiques*. Ces molécules sont constituées principalement de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote

BIOCYBERNETIQUE

La cybernétique* en biologie c'est l'application des méthodes et des procédures de la cybernétique à l'étude des organismes vivants, c'est la modélisation de leur fonctionnement et la mise au point de dispositifs auxiliaires pour ce bon fonctionnement.

On s'y livre à l'étude des questions générales de régulation, de conservation, de transformation et de transmission de l'information dans les systèmes vivants.

On y conçoit des systèmes artificiels, reproduisant l'action et le rôle de certains organes. D'où une cybernétique médicale, qui se dote aussi d'une imagerie non invasive sophistiquée (Cf. Imagerie RMN*).

BIODIVERSITE

Le terme de biodiversité est un néologisme créé par Edward O. Wilson en 1986 pour désigner « la totalité de toutes les variations de

tout le vivant ». Le succès de ce néologisme qui remplace la notion plus ancienne de « biological diversity », utilisé en 1980 par Thomas Lovejoy, n'est pas sans rapport avec la prise de conscience brutale de l'extinction des espèces aux cours de ces dernières décennies. La biodiversité est la dynamique des interactions dans des milieux en changement.

Deux notions essentielles sont mises en évidence

1. La biodiversité c'est « tout le vivant », donc l'homme en fait partie.

2. La biodiversité c'est la dynamique des interactions. Or si l'on parle maintenant autant de biodiversité, c'est bien à cause d'interactions essentielles dont celles causées par nos activités.

Le sommet planétaire de Rio de Janeiro en juin 1992, dans son article 2, donne la définition suivante:

« La biodiversité est la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein d'une espèce et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes ».

Selon cette définition, la biodiversité concerne tout le vivant (espèces sauvages et domestiques) ainsi que toutes les écosystèmes de la biosphère y compris les zones industrielles. Les frontières de biodiversité sont floues, et le terme recouvre un ensemble de concept hétérogène. Cependant, les Biologistes distinguent trois à cinq niveaux de biodiversité :

- 1- La biodiversité écologique (des écosystèmes).
- 2- La biodiversité spécifique (des espèces au sein de ces écosystèmes),
- 3- La biodiversité des populations (isolats d'une même espèce)
- 4- La biodiversité des individus (phénotypes*)
- 5- La biodiversité génétique (au sein d'une même espèce)

Les néo-darwinistes* estiment que la diversité « utile » est représentée par le pool génétique (niveau 5). D'autres se limitent aux niveaux 1, 2 et 5. De ces différentes appréciations dépendent les politiques de conservation de la biodiversité. Une difficulté majeure qui se pose, pour mettre en œuvre une stratégie de préservation, est la mesure quantitative et qualitative de cette biodiversité.

Pour les uns, la biodiversité est un tout indivisible, s'étendant à toute la biosphère ; elle est irréductible à un indicateur. Ce point de

vue rejoint l'hypothèse Gaïa de James Lovelock (1969), selon laquelle la terre constituerait un « super-organisme » qui s'autorégulerait au bénéfice de l'ensemble de la biosphère. Pour d'autre, il est possible de faire l'inventaire des différentes entités de la biodiversité et de ses variations quantitatives et qualitatives dans le temps et l'espace. La mesure la plus accessible est le dénombrement des espèces* (catégories morphologiquement différenciées par la spéciation). Ce dénombrement montre un déclin significatif des espèces connues. Les plus pessimistes estiment que 100 000 espèces disparaissent chaque année par érosion de la biodiversité. La biodiversité émerge d'une dynamique relationnelle entre le vivant et la biosphère, un équilibre fragile menacé par l'activité humaine. Parmi les facteurs réducteurs de la biodiversité on peut citer :

- La pollution physique et chimique des écosystèmes
- L'homogénéisation des écosystèmes L'agriculture
- La monoculture intensive.
- La production d'organismes génétiquement modifiés
- Le clonage*

La biodiversité procure un avantage dans les processus d'évolution des espèces, puisque c'est à partir d'elle que le vivant s'adapte aux variations de l'environnement, et se complexifient avec le temps. Aussi l'étude de son origine intéresse de nombreux chercheurs. Parmi les différentes sources de biodiversité on peut citer :

- La mutation génétique (avec un taux de mutation très faible de 10^{-5})
- Le mode de reproduction sexuée, qui par la réduction méiotique est souvent considérée comme un accélérateur de la biodiversité
- Les échanges chromatiniens (crossing over) méiotique et mitotique
- Les facteurs épigénétiques* qui modulent l'expression du génome au cours de la différenciation (une variation brutale dans l'écosystème peut générer une nouvelle variété).

Un des problèmes qui se pose en génétique des population est le maintien de la biodiversité (polymorphisme), et plus particulièrement des mutations défavorables qui sont éliminées par la sélection. Ainsi, l'avantage du « plus faible » a été mis en évidence dans les phénomènes de la vigueur hybride, avec la meilleure résistance des individus portant deux allèles différents (hétérozygotes). A l'opposé de la génétique, c'est sur le terrain de l'écologie (la science des interactions entre les individus et leur environnement) que c'est forgé la notion de diversité des écosystèmes, de leur durabilité et de

leur résilience sous l'impact de l'homme. Certains chercheurs n'hésitent pas à quitter le point de vue naturaliste, pour étendre la biodiversité aux sciences sociales, à la biodiversité des territoires, à la diversité bioculturelle.

Damien Schoevaert

BIOINFORMATIQUE

La bioinformatique applique des algorithmes calculatoires et des méthodes statistiques à des ensembles de données biologiques concernant en général l'ADN*, l'ARN* ou des séquences protéiques. Elle s'occupe en particulier de la comparaison des séquences, de la recherche des séquences dans une base de données, de la recherche des gènes et de la prédiction de leur expression. La bioinformatique occupe une grande partie du terrain de la biologie mathématique*.

BIOLOGIE

Le but de la biologie est l'explication* de ce qu'est la vie.

Avant que la biologie scientifique n'apparaisse, une explication régnait, le vitalisme*. C'était la croyance en l'existence d'une force intérieure spéciale responsable des propriétés de la vie. Cette force n'avait aucune existence physique et s'avérait purement métaphysique. Cependant le vitalisme expliquait une grande variété de phénomènes biologiques comme pourquoi les animaux étaient animés ou comment les cellules se divisent. Les opposants au vitalisme, partisans d'une attitude mécaniste* et réductionniste* avaient beaucoup de mal à réfuter les arguments de cette doctrine. Les partisans du vitalisme furent nombreux jusqu'au milieu du XXème siècle.

Une réfutation du vitalisme fut produite par le français Stéphane Leduc avec ses expériences de *Vie Artificielle* ou de *Biologie Synthétique*. Il obtient des formes étonnamment analogue à des formes vivantes par des phénomènes de diffusion d'un liquide dans un autre, des phénomènes de cristallisation dans un milieu visqueux ou des phénomènes électriques. Il comprend que c'est le mouvement qui crée les formes. Une démarche de cinquante ans en avance sur son siècle. On ne peut mieux faire que de le citer :

« Le fait que les formes et les structures sont l'expression des mouvements et des forces, qui les accomplissent et qui les engendrent, et d'autre part l'uniformité de structure dynamique de beaucoup de phénomènes de l'univers, donne l'explication physique des admirables et

surprenantes analogies de forme observées dans les productions de la nature semblant les plus éloignées et les plus étrangères les unes aux autres »

Cette idée que le mouvement crée les formes attendra 1954 et les travaux de Turing* sur la morphogénèse* pour réapparaître. Une idée essentielle qui sous-tend toute la pensée contemporaine sur l'auto-organisation*. 1954 année miracle où la biologie scientifique se constitue, avec la découverte de la structure de l'ADN*. La biologie moléculaire* va désormais battre en brèche le vitalisme

Dans les années 80 la simulation numérique prend la place de la simulation analogique de Leduc au moyen d'algorithmes dont les automates cellulaires* dans la production de la Vie Artificielle*.

Au milieu du XX^{ème} siècle la recherche d'une alternative au vitalisme prend un tour nouveau. Plutôt que de chercher à créer la vie à partir de matériaux inanimés, l'intérêt se tourne vers l'étude des blocs moléculaires de la vie. L'attention se porte sur la structure de l'ADN* et s'éloigne de la problématique de l'origine de la vie. La biologie moléculaire est une approche structurale atomistique de la vie et non pas un discours sur l'origine de la vie.

La vie se présentant sous tellement de formes et à des échelles si différentes que la biologie couvre un très large spectre, qui va du niveau moléculaire, en passant par celui de la cellule, puis de l'organisme, jusqu'au niveau de la population et de l'écosystème. Ces différents niveaux montrent que le domaine du vivant est fortement hiérarchisé et au fur et à mesure que la biologie progresse, elle se spécialise en de multiples domaines, tous plus ou moins liés aux autres.

Au cours de l'histoire de la biologie, des principes fondateurs ont été découverts. Les plus importants, qui régissent totalement le domaine du vivant et même le définissent sont :

- l'évolution* qui fait qu'à chaque génération une sélection naturelle est réalisée, amenant les caractères des êtres vivants les mieux adaptés à une situation particulière à avoir plus de chance d'être présents dans les générations suivantes
- l'hérédité*, qui assure la transmission des caractères innés d'un individu à sa descendance.

La biologie pose de nombreux problèmes conceptuels et philosophiques.

Tout d'abord celui de la réductibilité du biologique au physico-chimique. La question du réductionnisme en biologie*. Le problème de

l'organisme* et de l'espèce*. Le problème de l'identité*. Le problème de l'évolution* de l'espèce toute entière. Le problème de la finalité*. Le problème de la conscience* et du fonctionnement cérébral. La complexité d'un système biologique*.

On est encore loin de la constitution d'une biologie théorique*.

La difficulté de la biologie réside tout d'abord dans l'extraction des faits* à partir de l'expérience*. A la différence de la physique la biologie est totalement adossée à l'expérience et laisse peu de place à la spéculation théorique à priori. L'interprétation des faits a lieu à l'aide de modèles souvent naïfs. Les explications sont rares et souvent fragiles pour des systèmes aussi complexes. Même l'explication universelle par la structure de l'ADN* et du code génétique* a atteint ses limites. Il reste à la biologie à trouver des bases scientifiques profondes.

BIOLOGIE ET MECANIQUE QUANTIQUE

BIOLOGIE MATHEMATIQUE

Modélisation* mathématique des processus et des structures des systèmes biologiques.

De tous temps les grands mathématiciens se sont penchés sur des problèmes liés à la biologie. Celle-ci offre en effet un large spectre de situations complexes où les mathématiques ont leur mot à dire.

Fibonacci, Cardan, Fourier*, Gauss*, Helmholtz*, Riemann*, Einstein*, Volterra, d'Arcy Thompson*, Turing*, Wiener*, Von Neumann*, Thom*, Gelfand* sont à l'origine d'application des mathématiques à des problèmes biologiques et de développement des mathématiques motivés par les sciences de la vie. Des exemples de ces interactions sont fournis par l'emploi des processus stochastiques* et des méthodes statistiques* pour résoudre des problèmes de génétique*, d'épidémiologie ou d'écologie*, ainsi que par l'emploi récent de la topologie* pour l'étude de l'ADN* et de la génomique*. Les neurosciences théoriques* sont un large domaine d'application des méthodes mathématiques les plus diverses en particulier dans l'étude des réseaux* de neurones artificiels. Le langage et la théorie des systèmes dynamiques envahissent tout le domaine de la dynamique des systèmes complexes*.

La biologie mathématique concerne la modélisation des systèmes biologiques et l'analyse des données informatiques de la biologie moléculaire* et cellulaire*. Elle s'occupe de la dynamique et du traitement des maladies virales comme le HIV, l'influenza ou

l'hépatite, de la modélisation du système immunitaire, de l'interaction entre ligand et récepteur et de la signalisation cellulaire, des aspects calculatoires lié au décryptage du génôme humain, de la reconnaissance des formes dans les séquences de l'ADN*, de la caractérisation et la prédiction des structures macromoléculaires, du fonctionnement et de la dynamique des protéines* ainsi que de leur conformation. Elle comprend des champs aussi divers que la bioinformatique*, la biocybernétique*, l'étude des systèmes biologiques* et la biologie systémique* et les neurosciences théoriques*. Elle intervient massivement dans la biophysique*.

Il existe entre la biologie et les mathématiques de vastes territoires au contours encore incertains, au statut plus ou moins officialisé, lieux encore très ouverts où la démarche transdisciplinaire est possible. Avec quels moyens ? Solomon Marcus, en évoquant cette question les résumait ainsi : "*Pour le moment, le compromis adopté peut se résumer en deux mots : modèles* et métaphores."**

Deux obstacles majeurs freinent l'« intrusion des mathématiques dans la biologie : la diversité du vivant et sa complexité. Dans l'étude de la diversité l'apport des statistiques et des probabilités est considérable. Dans l'étude de la complexité, qu'il s'agisse de formes, de systèmes, de processus, les mathématiques rendent possible une description globale, non exhaustive, qui fait émerger des structures, des organisations.

Analyser un système biologique (dans sa forme, ses fonctions, son évolution), c'est comprendre son organisation et ses relations avec l'extérieur. C'est proposer une structuration en sous-systèmes suffisamment simples pour se prêter à l'analyse, c'est-à-dire dont les règles d'organisation et de fonctionnement sont accessibles et peuvent être formalisées. Le problème majeur reste celui des interactions entre ces sous-systèmes : à quelles échelles se placent-ils ? Quelles dépendances, quelles coordinations les unissent ? Quelles régulations assurent le fonctionnement global, quelle est la part du hasard dans leurs relations ? A partir de l'analyse du vivant, il faut en construire une représentation qui le résume à ses structures et à ses règles essentielles, et qui propose des modèles formalisés d'organisation et d'évolution. Ces modèles théoriques peuvent être considérés comme trop simplistes, puisqu'ils excluent une bonne partie de la variabilité, mais c'est ce qui leur donne leur valeur heuristique. Seule la confrontation de ces modèles aux réalités biologiques qu'ils sont censés représenter permet de les valider et d'accepter les hypothèses et les règles sur lesquelles ils sont construits.

Les mathématiques dépassent le statut d'outil pour participer directement à la conceptualisation et à la théorisation du système vivant. Le contenu théorique de la biologie, qui a longtemps manqué, a pris de la consistance au point qu'il est aujourd'hui incontournable. Une «biologie théorique*» s'est peu à peu développée qui, comme toutes les théories scientifiques, est constamment à l'épreuve des faits et sujette à contestation, révision ou rejet. Elle a l'immense mérite de fournir une explication plausible du vivant et de proposer de nouvelles approches expérimentales. Elle permet aussi d'intégrer la dimension temporelle et autorise des prédictions, avec toujours une part d'incertitude d'autant plus grande que le système est plus complexe ou que l'échelle de temps est plus longue.

BIOLOGIE MOLECULAIRE

Etude de la structure complexe et de la reproduction des organismes vivants en terme de leurs constituants moléculaires.

Mais ce que l'on appelle aujourd'hui la biologie moléculaire est née de la fusion de deux disciplines distinctes, la génétique*, qui étudiait le gène*, et la biochimie qui étudiait principalement les protéines*. Des résultats expérimentaux montraient bien que des gènes codaient pour des enzymes* puis que les gènes étaient constitués d'ADN*. Mais la révolution, une des plus grandes révolution scientifique* du siècle dernier, se produisit lorsqu'en 1954, Watson* et Crick* établirent la structure en double hélice de l'ADN, montrant ainsi la structure biochimique du gène*. On comprit le mécanisme principal de l'hérédité*, par ouverture de la double hélice et codage de la synthèse des protéines par les gènes. Une des voies principale d'accès à la connaissance du vivant s'ouvrait devant les chercheurs, surpris de voir l'ADN porteur de l'hérédité.

L'ADN était connu comme un polymère linéaire de quatre molécules, constituant un acide nucléique* ou polynucléotide. L'adénine (A), la guanine (G), la thymine (T) et cytosine (C), contenant toutes un noyau aromatique*. Ce sont, chimiquement, des bases* puriques et pyrimidiques. Ces molécules se trouvent reliées par un squelette de phosphates et de sucres.

Alors que certains virus ont un ADN avec un seul filament, l'ADN de la plupart des êtres vivants consiste en deux chaînes antiparallèles ou filaments, disposées en double hélice dans lesquelles les nucléotides se présentent par paires reliées par liaison hydrogène*. L'adénine sur une chaîne correspond à la thymine sur l'autre, de

même pour la guanine et la cytosine. La succession des nucléotides sur une chaîne spécifique totalement celle sur l'autre chaîne. C'est cette redondance qui est à l'origine de la réplication des êtres vivants, par séparation des deux chaînes, chacune servant de modèle pour la formation d'une nouvelle double hélice qui se trouve transférée dans une nouvelle cellule. Ce processus de réplication est effectué grâce à des enzymes* appelés ADN polymérases. Les mutations sont des modifications dans la suite des nucléotides, dues à des causes extérieures comme la lumière solaire ou des agents chimiques ou bien se produisant comme erreur lors de la réplication.

Reste à savoir comment l'alphabet de 4 lettres de l'ADN peut coder les instructions pour produire l'alphabet de 20 lettres des acides aminés d'une protéine. Les gènes sont des brins d'ADN sur le chromosome. Leur expression commence avec la transcription de la séquence de l'ADN en une molécule messagère, l'acide ribonucléique* (ARN). Cette transcription est effectuée par des enzymes appelés ARN polymérases. L'ARN est structurellement semblable à l'ADN, dont il diffère par la nature du sucre ; il est constitué par quatre bases A,U,C,G où U, l'uracile joue le rôle de la thymine T. Cet ARN messager (mARN) est une copie de l'ADN selon la règle usuelle de correspondance des bases : U dans l'ARN correspond à A dans l'ADN, A correspond à T, G à C, et C à G. L'ARN messager copié à partir d'un gène est fait d'une seule chaîne et transmet l'information à partir du noyau cellulaire où se trouve l'ADN au cytoplasme où s'effectue la synthèse des protéines à l'aide d'une remarquable machine moléculaire, le ribosome*.

Le dogme central de la biologie moléculaire, selon l'expression de Crick en 1970, s'exprime alors ainsi :

1. L'ADN réplique son information dans un processus où interviennent de nombreux enzymes, c'est la réplication. L'ADN donne un ADN.
2. L'ADN code la production de l'ARN messager pendant la transcription. L'ADN donne un ARNm.
3. Dans les cellules eucariotes* l'ARNm migre du noyau au cytoplasme de la cellule.
4. L'ARNm apporte l'information aux ribosomes qui la lisent et l'utilisent pour la synthèse des protéines, c'est la traduction.
5. Les protéines ne codent pas la production de protéine, d'ARN ou d'ADN. Elles sont impliquées dans toutes les autres activités biologiques, structurales ou enzymatiques.

Reste alors à comprendre comment fonctionne le code génétique*. Celui-ci est porté par un brin d'ADN et se trouve constitué par une suite de nucléotides. La lecture s'effectue par triplets de nucléotides sur l'ARNm. Chaque triplet est appelé un codon* et correspond à un acide aminé*. Un gène* est un ensemble de codons. La lecture du gène s'effectue par triplets sans recouvrement. Le code est alors décrit en termes des nucléotides présents dans l'ARN : U, C, A et G. Le ribosome lit les nucléotides de l'ARN et produit une suite d'acides aminés. La correspondance triplet de nucléotide avec acide aminé s'effectue grâce à une molécule adaptatrice, l'ARN de transfert, l'ARNt. C'est une petite molécule de quelques dizaines de nucléotides, à laquelle un acide aminé se trouve lié par liaison covalente. Elle apporte l'acide aminé au contact de l'ARNm où elle reconnaît un codon, grâce à son anticodon*. La jonction codon-anticodon se fait par appariement des nucléotides par liaisons hydrogène. L'ARNt joue donc un rôle central dans le transport des acides aminés selon le choix d'un anti-codon.

Voilà les grandes lignes de la biologie moléculaire. Les détails sont extrêmement complexes et font intervenir de nombreux participants moléculaires. Notons ici le rôle décisif de la liaison hydrogène*, liaison faible qui s'établit et se défait à souhait.

Remarquons que l'ADN joue le rôle central dans la synthèse des protéines et l'hérédité mais ne joue aucun rôle dans les processus biochimiques généraux, ce qui correspond bien à la compartimentation des structures et des fonctions, caractéristique du vivant.

De par sa richesse la biologie moléculaire a exercé une fascination telle que l'on a négligé les autres processus moléculaire de la vie. La biologie moléculaire est une biologie génomique* inscrite dans un paradigme ADN- information, où s'exerce l'influence de la théorie de l'information* et de la cybernétique*. Cette situation est en train de changer par le développement d'une biologie post-génomique*.

L'histoire de ce que l'on peut faire avec 4 bases puriques et pyrimidiques et 20 acides aminés* ne s'arrête pas là, à planter un décor, mais s'ouvre sur un monde complexe où les phénomènes dynamiques (vivants) imposeront leur caractère.

La biologie moléculaire s'inscrit dans l'atomisme* du XX^e siècle et sa conception de l'apparition des formes* est tout à fait platonicienne dans la mesure où les formes sont construites à partir de « briques élémentaires ». La biologie post génomique* est une revanche de l'aristotélisme*, car c'est le mouvement qui y crée les formes.

BIOLOGIE (PHILOSOPHIE DE LA)

Tout comme pour la mécanique quantique* il ne faut pas confondre la discussion des faits de la biologie avec une philosophie de la biologie. En l'absence de biologie théorique* et de grands concepts unificateurs, la philosophie de la biologie reste très limitée dans ses objectifs et dans ses discours, se cantonnant trop souvent à des métaphores filées, comme c'est le cas pour l'information biologique*.

Quatre grandes leçons se dégagent des faits biologiques : « Tout dépend de tout », « Aucun fait biologique n'a de sens considéré en dehors de l'évolution biologique* », « Tout organisme est un système ouvert* » « Les activités biologiques sont strictement localisées et compartimentées, et il n'y a pas d'organisme vivant sans un extérieur et un intérieur ». Quant à l'usage perversif de la notion d'information* il a été l'objet de lourdes critiques, mais il n'y a pas d'organisme sans génome*. (Cf. Organisation en biologie*). Il y a une véritable sociologie du vivant, sociologie moléculaire au niveau de l'organisme*.

Comme pour la chimie*, la philosophie de la biologie a tardé à se constituer. Un nouveau journal « Philosophie et biologie » n'apparaît qu'en 1986 ! La physique* et les mathématiques* ont longtemps monopolisé toute l'attention. Et ceci bien qu'Aristote*, le père de la philosophie des sciences, ait été tout autant philosophe que biologiste. Que la biologie n'ait pas intéressé les philosophes serait dû selon certains à la prédominance du positivisme* et du positivisme logique* que seules la théorie de la relativité* et la mécanique quantique* intéressaient. L'intérêt pour les « sciences humaines » - linguistique, sociologie, psychologie*, psychanalyse*, a ensuite détourné les philosophes de la biologie. Ce qui est regrettable, car la biologie et les sciences humaines ont des intérêts conceptuels communs dans l'élaboration d'un langage adapté à la description des systèmes complexes*. On peut aussi avancer que la constitution d'une montagne scientifique comme la biologie moléculaire* ait accaparé tous les efforts des biologistes en activité, soutenus en cela par les autorités politiques et par les acteurs industriels.

Une philosophie de la biologie se devrait de discuter les grands thèmes de la philosophie des sciences*.

Répondre à la question primordiale de la nature de l'espace temps où se déroulent les phénomènes biologiques. Ce ne sont certainement pas l'espace euclidien ordinaire ni le temps de nos horloges. Il y a là derrière de redoutables problèmes de topologie*. Il

faut réfléchir au sens des topologies complexes de l'ADN* et des protéines*, des cellules* et des organismes*.

La régulation de la **topologie** de la gigantesque molécule d'ADN à l'intérieur du noyau de la cellule est indispensable pour son bon fonctionnement. Les acteurs de cette régulation, appelés topoisomérases, sont des enzymes capables d'opérer localement des coupures réversibles dans la molécule pour permettre la relaxation de la contrainte de torsion ou pour simplifier des structures entremêlées. Si les études biochimiques ou structurales ont enrichi notre connaissance de leur mécanismes, désormais les techniques de micromanipulation d'ADN permettent une étude en temps réel de la dynamique d'action de ces moteurs moléculaires*.

Examiner les grandes questions de causalité*, de déterminisme*, de lois de la nature*, de finalité*, de symétrie* et d'invariance*, de réalisme* et d'empirisme*, de réductionnisme*, de niveaux de la réalité*, de la sémiotique des modèles* et de la simulation*.

Il faut surtout réfléchir aux problèmes de stabilité que posent les systèmes vivants, qui renouvellent tous leurs composants sans changer globalement d'aspect si l'on excepte le vieillissement*. Aider à comprendre les phénomènes de stabilité structurelle* que l'on soupçonne derrière tout cela.

Mener l'épistémologie* de la biologie de l'évolution*, de la biologie du développement, de la biologie moléculaire*, des neurosciences*, en ayant pour guide le problème éternel des rapports de la matière* et de la forme*.

Un des points de vue essentiel aujourd'hui semble la discussion des systèmes vivants comme systèmes complexes*. De la même façon qu'une suite aléatoire de nombres est incompressible, on peut se demander si la meilleure représentation d'un système complexe n'est pas en définitive le système lui-même. A la question de l'origine cosmologique de la flèche du temps ne faut-il pas adjoindre celle de l'origine cosmologique de la vie ? Faut-il tenir compte d'un principe anthropique* ? On replacerait ainsi le phénomène vivant dans le cadre qui lui est propre.

On peut se demander, sans pour autant sombrer dans le vitalisme*, si des principes nouveaux régissant les systèmes complexes n'interviendraient pas en biologie, tout comme l'ensemble de la chimie découle du principe d'exclusion de Pauli*. Des principes d'optimalité ou des principes de structuration, des principes d'évolution ou des principes d'environnement. On doit discuter la question de savoir selon quels principes l'esprit et la conscience émergent de l'activité du cerveau physique.

Réfléchir à ce qui constitue une explication* en biologie. On y retrouve la chaîne classique des faits*, des interprétations* et des explications*. Une chaîne qui se referme sur elle-même, puisque le choix des faits dépend des théories préétablies ou de considérations idéologiques générales. Trouver une explication en biologie constitue la plupart du temps une réfutation du vitalisme*. De telles réfutations peuvent être trouvées dans des expériences de vie artificielle*, des simulations* analogiques de Stéphane Leduc dans sa *Biologie synthétique* (1912) aux simulations digitales de Langton (1977) au moyen d'automates cellulaires*. Toutes ces simulations ne sont pas tant des parodies de la vie que des simulations des dynamiques biologiques, régies par les mêmes équations d'évolution. Ce que Leduc avait parfaitement compris, lui qui soulignait que l'uniformité de structure dynamique de beaucoup de phénomènes de l'univers, donne l'explication physique des analogies de forme observées dans la nature. C'est dans le même esprit qu'il faut voir les travaux de Turing sur la morphogénèse biologique* (1952).

Turing se demandait comment les cellules interagissent pour produire des structures et des formes (embryogénèse* ou les taches sur un léopard). Il imagina un système théorique idéalisé contenant le nombre minimum de variables nécessaires pour produire une rupture de symétrie* à l'origine de formes. Ceci se manifeste dans une équation dynamique dont la solution présente les caractères requis. On peut se demander ce que Turing explique. Pour un biologiste mathématicien ou un physicien théoricien l'argument est éloquent et solide. Pour un biologiste expérimentateur ceci est une idéalisation qui peut ou ne peut exister comme un fait. Et ceci malgré le grand développement des modèles de morphogénèse.

L'absence d'observation directe des objets et des phénomènes *in vivo* conduit à l'utilisation massive de modèles*. Ce ne sont pas les imageries modernes, du microscope électronique* et de la diffraction des rayons X* aux microscopies à champ proche* et à l'imagerie par résonance magnétique nucléaire* qui changeront cette situation. Ces imageries n'offrent en effet que des images reconstituées à l'aide de modèles.

L'usage de modèles mathématiques s'est largement développé, surtout depuis l'apparition du calcul électronique. Modèles* et simulations* tentent de reconstituer ce que l'on ne voit pas directement, et d'interpréter l'avalanche de données fournies par l'expérimentation. Il y a là pour le philosophe matière à riches réflexions épistémologiques.

Ce que l'on appelle aujourd'hui biologie mathématique* a été inauguré par les travaux de Rashevsky dès 1934. Son développement est considérable. Mais à défaut de constituer une biologie théorique* elle est une source possible d'inspiration pour l'expérimentateur. Ainsi les modèles d'autooscillateurs* ont largement contribué à la compréhension des phénomènes rythmiques en biologie, comme l'activité du cœur ou les émissions périodiques d'hormones.

L'adéquation d'un modèle à la réalité des faits s'effectue en général par l'utilisation de métaphores*. En biologie la métaphore est partout, pour passer du modèle à l'expérimentation ou pour tenter une explication des faits. Les métaphores interviennent dans la constitution des ressemblances et des différences sur lesquelles s'appuie notre catégorisation des phénomènes naturels, et dans l'incitation à réaliser telle expérimentation spécifique. L'efficacité d'une métaphore, comme celle d'un acte de parole, dépend de l'existence de conventions sociales partagées. Le philosophe peut chercher à recenser et à classer les métaphores en biologie. Etudier la nature des relations entre l'évolution des métaphores, l'émergence de nouveaux programmes de recherche et les mutations sociales concomitantes. Ainsi le vocabulaire informationnel s'est imposé dans la génétique* et la biologie moléculaire* des années 50 avec la proximité de la linguistique* et de l'informatique*. La cybernétique* a joué un rôle idéologique majeur. Large débat que celui qui oppose les tenants de l'information comme une métaphore à ceux qui défendent une version de l'information comme caractéristique objective. Débat qui rejoint celui sur la causalité en biologie. Notons aussi les métaphores mentalistes comme « reconnaître », « signal », « mémoire », ou l'utilisation du terme de « paysage » comme dans « paysage épigénétique ».

BIOLOGIE POST GENOMIQUE

La biologie moléculaire ou biologie génomique* s'inscrit dans le paysage scientifique des années 60-70 marqué par la notion d'information* et de programme*. A partir des années 80 s'installe une culture non linéaire* et un néomécanisme* dont la vague déferlante atteint aujourd'hui la biologie sous toutes ses formes. Les problèmes de l'hérédité passent au second plan au profit des problèmes de l'organisation des systèmes complexes.

En 2001, la première publication du déchiffrement du génome* humain marque la revanche d'Aristote sur Platon. Trente mille gènes sont insuffisants pour accréditer la thèse du "Tout génétique". Une certaine biologie moléculaire centrée sur l'ADN doit déchanter. Une

autre théorie de l'hérédité* et de l'évolution biologique* doit se constituer. Il est étonnant de voir la critique jusqu'alors minoritaire de la divinisation du génôme*, devenir en un seul jour une nouvelle manière de penser.

C'est l'effondrement de l'astrologie* du XX ème siècle.

Que la détermination de la vie (humaine) soit renvoyée aux astres ou aux gènes*, c'est dans les deux cas une même erreur méthodologique. C'est vouloir coder par un phénomène structurellement instable, la mécanique classique hamiltonienne, un phénomène viscéralement structurellement stable*, la vie.

La biologie post-génomique marque la transition d'une approche analytique (décomposition en éléments simples) à une approche intégrative (organisation de ces composants en ensembles fonctionnels). C'est cet abandon de la causalité simple au profit des multicausalités systémiques, qui assure l'établissement de la stabilité structurelle. Elle est une biologie épigénétique*, donnant à la biologie moléculaire* sa juste place dans une biologie systémique*.

La correspondance complexe entre génotype et phénotype provient de quatre sources :

- La manière dont s'établit la relation entre une séquence d'ADN* et la structure chimique des protéines
- Les relations entre les produits de la transcription et la traduction de l'information codée dans le génome
- La dépendance du développement et de la physiologie tant du génotype que de l'environnement de l'organisme
- Les variations aléatoires des processus moléculaires à l'intérieur des cellules.

Ces relations complexes entre génotype et phénotype proviennent de ce que la constitution d'un être vivant n'est pas un jeu de construction mais un processus dynamique non linéaire*, où prévalent les processus d'autoorganisation*.

BIOLOGIE QUANTIQUE (Cf. Biologie et mécanique quantique*)

BIOLOGIE SYNTHETIQUE (Cf.Biologie*, Biologie (Philosophie de la)*, Vie artificielle*.)

En 1913 Stéphane Leduc a appelé Biologie Synthétique ses tentatives de modélisation analogique des formes vivantes, en comprenant qu'analogie de forme signifiait analogie des dynamiques productrices des formes.

Dans les années 2000 ce terme est repris pour désigner des travaux à la rencontre entre la biologie et l'ingénierie, en particulier

celle des circuits électriques. En fait ils expriment l'arrivée en biologie de la vague de la théorie des systèmes dynamiques non linéaires.

Approfondissant les démarches de la biologie systémique* la biologie synthétique utilise les métaphores de l'ingénierie pour décrire les organismes biologiques et leur comportement. Des notions d'ingénieur comme la robustesse*, la modularité* et la redondance* deviennent des concepts théoriques de base. Le concept de bruit* offre un exemple particulièrement frappant d'un tel transfert interdisciplinaire. Il se présente sous un double aspect de nuisance et d'utilité fonctionnelle. Il joue un rôle positif dans différents processus comme le développement, la différenciation, la compétence génétique et l'évolution*. Les circuits électriques sont à l'origine de nombreux modèles biologiques. (Cf. Dynamique non linéaire et chaos en biologie*).

L'élaboration de modèles « synthétiques », c.a.d. de systèmes biologiques nouveaux simplifiés, offre un nouvel outil pour l'étude de principes possibles dans la construction de systèmes biologiques. Un exemple est donné par le « Repressilator », un circuit génétique oscillant, destiné à explorer les mécanismes de régulation de fonctions biologiques comme le rythme diurne/nocturne des organismes. La dynamique de tels réseaux est souvent analysée en terme de mécanismes de rétroaction*non-linéaire.

Les modèles synthétiques sont à mi-chemin entre les modèles mathématiques et les organismes modèles. En utilisant le modèle mathématique comme patron, la biologie synthétique construit un modèle à partir de composantes biologiques réelles comme les gènes et les protéines.

Le Repressilator est un réseau génétique formant un circuit de trois gènes répresseurs*, où chaque gène réprime l'expression du suivant ce qui conduit à des oscillations dans la concentration des protéines.

BIOLOGIE SYSTEMIQUE (Cf. système biologique*)

La biologie systémique envisage les systèmes biologiques du point de vue de leur contrôle* et de leur régulation*. Elle prend ses origines dans les travaux de Claude Bernard*, le père de la physiologie*, et de Walter Cannon sur la régulation des paramètres physiologiques, ce qu'il a dénommé homéostasie*.

L'idée que l'appartenance à un réseau puisse conférer de la stabilité a émergé de la théorie générale des systèmes* de Ludwig von

Bertalanffy* dans les années 30 et des conceptions de la cybernétique de Norbert Wiener* dans les années 40.

La théorie générale des systèmes s'attachait à la notion de flux, postulant l'existence et la signification d'un équilibre des flux. Contrairement à la conception de Cannon sur l'existence de mécanismes conduisant à l'homéostasie*, la théorie générale des systèmes invite le biologiste à considérer d'autres modèles où des processus non linéaires* de non-équilibre* garantiraient la stabilité sinon la constance.

Wiener a marié la théorie des systèmes et la théorie du contrôle, en montrant que la communication et le contrôle sont inséparables, en insistant sur le rôle de la rétroaction* dans la régulation. En 1970 un mécanisme régulateur avec rétroaction a effectivement été décrit à un niveau moléculaire par Jacob et Monod qui ont étudié des protéines* régulatrices et les interactions d'enzymes* allostériques. Ils ont introduit une distinction entre des gènes structuraux (qui codent pour les protéines) et les gènes régulateurs qui régulent la vitesse à laquelle les gènes structuraux sont transcrits. Ce contrôle de la vitesse de synthèse des protéines a été la première indication du rôle de processus dynamiques et de la rétroaction régulatrice. Des rétroactions négatives sont utilisées dans toutes les cellules et les voies métaboliques. Le contrôle de ces processus est accompli par les enzymes régulateurs qui répondent à la concentration des effecteurs en augmentant ou diminuant les vitesses de réaction.

Les organismes dans leur totalité sont des systèmes auto-régulateurs, adaptatifs et anticipateurs, ce dont on a de nombreux exemples.

BIOLOGIE THEORIQUE

Contrairement à la physique qui a constitué très rapidement un discours théorique, la physique théorique*, la biologie n'a pas constitué une biologie théorique, sans doute en l'absence d'une réelle définition du vivant. Ce qui signifierait sans doute l'apparition d'un « néo-vitalisme ». Deux corps de doctrine émergent cependant, l'évolution darwinienne*, qui reste le sujet de bien des polémiques et la biologie (génétique) moléculaire* qui promeut un récit des origines* de la vie, centré sur la notion de code*, récit qui n'est pas celui que tient la physique sur l'origine des formes* où l'on privilégie l'auto-organisation*.

Par contre tout comme il existe une physique mathématique*, il existe aujourd'hui une biologie et une biophysique mathématiques*.

Elles sont principalement constituées par l'étude des systèmes dynamiques* biologiques et la modélisation* mathématique des systèmes biologiques. Les neurosciences théoriques* en sont un bon exemple.

Il existe plusieurs courants se réclamant de la biologie théorique :

Un courant basé sur l'information* ou plutôt sur les relations entre les objets de la biologie. Il met en évidence de réseaux et met en avant notamment le concept d'auto organisation*.

Un courant qui s'inspire de Turing* et de René Thom* où la théorie des catastrophes* vient seconder l'auto organisation* dans une approche de la morphogénèse biologique*.

Un courant fondé à travers la compréhension du développement des organismes issu de l'embryologie expérimentale que les efforts récents des physiciens dans le cadre d'une morphodynamique contribue à mathématiser en le reliant au courant précédent.

Un courant d'écologie évolutive fondé sur la statistique*.

Un courant de biologie des systèmes ou biologie systémique*.

Un courant où les biologistes moléculaires* se joignent au débat, mais comme ils sont les défenseurs du paradigme* dominant, il est évident que les autres théories vont se construire par rapport à lui, si ce n'est contre lui, en s'accordant à dire que les modèles de la biologie moléculaire ont atteint leurs limites.

La biologie théorique se trouve confrontée à de grands problèmes philosophiques de la biologie*, la causalité* et le déterminisme*, la finalité* et l'émergence*.

La complexité métabolique de la vie rend peu probable une formulation mathématique de celle-ci. Les mathématiques conviennent à la mécanique mais pas à la biologie. De nouveaux langages inspirés de la linguistique*, de la logique* ou de la sémiotique* seront nécessaires. L'exemple des automates cellulaires* et de la vie artificielle* est à méditer.

BIOMINÉRAUX

Les biominéraux sont des formations de carbonate de calcium (Coquilles des mollusques et coraux) ou d'oxyde de silicium (radiolaires), et de protéines constituant les parties solides de certains organismes vivants. Ces productions s'accompagnent de l'apparition de formes étonnantes.

Le biologiste et philosophe Ernst Heinrich Haeckel (1834-1919) était fasciné par la beauté de ces formes naturelles. Il les a dessinées méticuleusement et était particulièrement fier d'avoir découvert le

monde microscopique sous-marin, en particulier les étonnants êtres monocellulaires que sont les radiolaires.

BIOPHYSIQUE

Application de la physique et de la physico-chimie à l'étude des systèmes organisés que sont les systèmes biologiques, de la molécule et de la cellule jusqu'à la biosphère. En principe, le rejet du vitalisme* devrait ôter son sens au terme BIOPHYSIQUE. Mais la spécificité des objets biologiques vient de ce que leur constitution dépend de l'évolution* et de l'existence d'un ensemble de gènes* (génom*) . Objets organisés, aperiodiques, hors de l'équilibre thermodynamique et adaptés à la performance de fonctions déterminées. L'objet biologique est notablement plus complexe que tous les objets physiques habituels. Il est caractérisé par la compartimentation et la participation de plusieurs étapes imbriquées, pour un même phénomène.

En l'absence d'une biologie théorique* on ne peut décrire la biophysique que sous forme d'un catalogue des thématiques. La biophysique contemporaine reflète fortement et illustre souvent de manière privilégiée les avancées de la physique de la seconde moitié du XX^e siècle. La culture non linéaire*, la synergetique*, la théorie qualitative des systèmes dynamiques* et l'étude thermodynamique des systèmes ouverts hors équilibre*, l'autoorganisation*, la mise à contribution de la connaissance précise des forces intermoléculaires pour la simulation sur ordinateur des structures moléculaires complexes que sont les macromolécules biologiques, la compréhension des phénomènes profonds de transports d'ions dans les membranes* cellulaires et de transfert d'énergie en particulier dans les processus photobiologiques*.

Le comportement cinétique des systèmes biologiques est modélisé par un ensemble d'équations différentielles* non linéaires*. Une des propriétés principales des systèmes ouverts est l'apparition d'états stationnaires*, différents de l'équilibre thermodynamique. Une autre situation fréquente est celle lorsqu'une réaction chimique s'accompagne d'une diffusion des produits de la réaction. L'examen de tels systèmes de réaction-diffusion* permet d'expliquer certains principes généraux des processus d'auto-organisation* dans les systèmes vivants, en particulier la propagation d'ondes et d'impulsions dans les tissus milieux actifs*, l'apparition de régimes auto-ondulatoires* de comportement des systèmes biologiques ainsi que les processus de création de formes* (morphogénèse biologique*).

L'étude de la stabilité et des bifurcations* joue un rôle croissant. Dans la théorie des catastrophes* on montre que pour les systèmes à un paramètre il n'existe qu'un seul type de bifurcation, le pli, alors que pour les systèmes à deux paramètres apparaît une autre bifurcation, la fionce. L'analyse du modèle proie-prédateur en ces termes est exemplaire.

Dans de nombreux systèmes il existe différents états stationnaires, avec transition de l'un à l'autre, ce qui se traduit par l'existence de points singuliers dans l'espace de phase. De telles situations se produisent dans le modèle biochimique de la régulation de la synthèse des protéines.

La biologie présente de très nombreux systèmes oscillants (rythmes biologiques*) : réactions biochimiques oscillantes, oscillation dans la glycolyse* et dans les réactions de fermentation, processus périodiques en photosynthèse* et bien d'autres. Ce sont toutes des réactions auto-oscillantes*.

La théorie qualitative des systèmes dynamiques est un outil puissant pour l'étude de la dynamique des systèmes biologiques. Elle constitue un chapitre fondamental de base de toute la biophysique.

La thermodynamique a gardé son rôle fondamental dans l'analyse des phénomènes biologiques, mais elle s'est enrichie de considérations sur les systèmes ouverts* et sur les systèmes hors équilibre*.

On dispose ainsi du théorème de Prigogine* sur le minimum de croissance de l'entropie. Dans un système ouvert dans un état stationnaire, au voisinage de l'équilibre thermodynamique, la vitesse de croissance de l'entropie due aux processus irréversibles internes passe par un minimum positif. Ce théorème est un critère quantitatif définissant la direction générale de variation autonome d'un système ouvert, un critère de son évolution. En particulier on peut ainsi prédire le passage à un état stationnaire au voisinage d'un état d'équilibre.

Il y a une grande quantité de travaux consacrés à l'analyse des phénomènes biologiques selon cette thermodynamique des processus irréversibles. Il s'agit soit de l'étude générale des processus du vivant comme la croissance, le développement, l'adaptation aux conditions extérieures, soit de l'étude de processus concrets du métabolisme cellulaire.

La thermodynamique de non équilibre* non linéaire étudie les situations où les régimes simples prédits par les lois linéaires deviennent instables, Loin de l'équilibre les états stationnaires peuvent perdre leur stabilité, et il peut apparaître spontanément des structures spatiales ou des oscillations à partir de systèmes parfaitement

homogènes au départ. Ces structures dissipatives* jouent un rôle déterminant en hydrodynamique, en chimie ou en biologie.

Au cœur de la biophysique se trouve l'étude de la conformation spatiale des biopolymères, protéines* et ADN*. C'est l'objet de méthodes expérimentales comme la diffraction* des rayons X lorsque le polymère peut être cristallisé. Une méthode nouvelle, la résonance magnétique nucléaire (RMN) permet d'élucider bien des structures.

Les biopolymères sont souples et leur conformation a un caractère statistique. On assiste chez les protéines* à une transition « hélice-pelote ». L'étude des changements de conformation est fondée sur la détermination de l'énergie libre des différentes conformations ainsi que sur la théorie des transitions de phase* dans les milieux condensés. Mais comme les dimensions des macromolécules sont limitées les changements de conformation ne sont pas brutaux ; il existe un domaine de paramètres où coexistent les deux conformations. Les variations d'enthalpie et d'entropie peuvent concerner une zone localisée de la macromolécule, mais tout en étant faibles profondément modifier le caractère de celle-ci.

La connaissance détaillée des structures moléculaires et des forces intermoléculaires* peut permettre de décrire par le calcul les conformations de toutes les molécules biologiques. Problème particulièrement difficile parce que le nombre élevé de degrés de libertés s'oppose à une démarche quantique frontale (ab initio) et que les surfaces de potentiel possèdent une multitude de minima locaux. Problème d'autant plus difficile qu'il faut tenir compte de la présence de l'eau et du caractère dynamique de toutes ces interactions. On peut espérer que dans cet espace de configuration si grand il existe des attracteurs* de faible dimension et des états conformationnels de non-équilibre, ce qui expliquerait que dans la nature un biopolymère trouve sa configuration spatiale « instantanément ». La richesse du paysage conformationnel des biopolymères provient du rôle majeur joué par des interactions moléculaires faibles (forces électrostatiques, forces de Van der Waals* ou liaison hydrogène*) et par les rotations autour de certaines liaisons simples. Sans l'eau et la liaison hydrogène la vie ne serait pas ce qu'elle est. Elle est dominée par l'extrême souplesse et l'extrême mobilité des protéines.

BIOSCENOSE

Une biocénose est un ensemble d'être vivants vivant dans un lieu de vie bien défini que l'on appelle le biotope.

Une biocénose est composée d'êtres vivants pouvant vivre en interaction directe entre eux ou non mais étant toujours en interaction

avec le milieu commun à tous. Ainsi deux plantes vivant dans le même milieu peuvent n'avoir aucun échange direct, mais elles ont chacune une action sur le milieu ce qui peut avoir des conséquences sur l'autre espèce. Par exemple, dans un champ, la mauvaise herbe peut puiser plus vite les nutriments de la terre ce qui empêchera le jeune plant de blé qui se trouve à côté de bien pousser.

BIOSEMIOTIQUE

Description du vivant en terme de processus de communication : les processus chimiques et physiques animant les êtres vivants sont envisagés comme des échanges, comparables aux échanges que permettent les symboles*, signes* et langages*. Des signes qui peuvent être des signaux ou des symboles, la plupart du temps des messages moléculaires. Des signes liés au comportement comme dans la danse des abeilles, ou des signes phonétiques comme chez les oiseaux ou les humains. Des échanges qui peuvent réussir ou échouer, voire causer des maladies. Une variante de l'approche informationnelle en biologie.

Ainsi, la biosémiotique ne constitue pas une nouvelle discipline mais réunit la biologie, les sciences du langage et les sciences de la communication. Ces praticiens décryptent la sémantique et la grammaire du vivant, en identifiant ses symboles de communication, leurs sens et leurs règles de combinaison. Remarquons que le sens d'un signal peut dépendre du contexte, comme pour un mot polysémique. L'adrénaline peut faciliter la fuite, quand l'anxiété et le stress sont de rigueur, ou favoriser la digestion, dans le cas contraire : le symbole adrénaline n'est pas univoque.

La biosémiotique a le mérite de considérer tout le spectre du vivant, des bactéries à l'homme en passant par les plantes. Les modèles de communication et de défense des végétaux, par exemple, seront comparés à ceux des animaux : une plante attaquée par un nuisible peut se défendre, en relâchant des substances volatiles répulsives (pour chasser le nuisible), informatives (pour prévenir ses congénères et les inciter à se défendre), voire attractives (pour attirer les parasites du parasite) . D'autres organismes peuvent faire de même, en employant des modèles de communication analogues.

Les concepts biosémiotiques ont été utilisés comme métaphores* en biologie moléculaire*, en biologie de l'évolution*, en génétique* et en écologie*, avec la conviction qu'elles seraient finalement remplacées par des description chimiques et physiques. Ceci permet d'élargir les perspectives sur les processus biologiques. On a même pu

dire que ce qui distingue le vivant c'est sa dépendance aux signes. Une dépendance qui se conçoit bien dans les perspectives de la stabilité structurelle* (Cf Stabilité structurelle – Problématique et enjeux*).

Le père de la biosémiotique, Uexküll*, disait que les organismes perçoivent le monde comme des signes* ; il a influencé Cassirer* qui disait que les humains perçoivent le monde à travers les symboles*. L'œuvre de Cassirer est une sémiotique* culturelle, qui souffre d'une approche purement culturelle de l'homme. Cassirer trouvait dans la pensée de Uexküll une origine biologique aux symboles.

BOITE NOIRE

Dénomination conventionnelle d'un système dont la composition et les phénomènes internes sont inconnus pour un observateur externe, qui n'a accès qu'à des actions externes (entrées, causes) et des réponses externes (sorties, effets). Tout ce que l'on sait du comportement du système doit (peut) alors être obtenu en étudiant les diverses réactions du système lorsque l'on modifie les entrées.

La boîte noire fait partie d'une démarche caractéristique de la cybernétique*, où la structure des systèmes, même lorsqu'elle est connue, est trop complexe pour que l'on puisse déduire le comportement de la prise en compte des parties constitutives et de leurs interactions.

Cette démarche est très générale. Elle se retrouve dans l'étude des systèmes électriques complexes, où l'on ne s'intéresse qu'aux relations entre les entrées et les sorties. Elle domine la psychologie béhavioriste* qui se refuse à caractériser les processus internes du cerveau (le pourrait-elle?) et se borne à caractériser le comportement par les relations entre les stimuli et les réponses. La Mécanique Quantique ne procède pas autrement à propos des systèmes de la microphysique.

La boîte noire est un système cybernétique, modèle abstrait du fonctionnement d'un système ouvert, défini par :

Les entrées, les sorties et l'état* interne du système.

L'état permet de prévoir les sorties en fonction des entrées (fonctionnelle de sortie).

L'état se modifie sous l'action des entrées (contrôle-fonctionnelle de transition).

L'état peut être déduit à partir des sorties (observabilité).

Une rétroaction* fait exercer une influence des sorties sur les entrées, ce qui modifie l'état

C'est un automate mathématique*.

Avec des noms différents tout ceci constitue le cadre même où opère la mécanique quantique : entrée- préparation* dans un état-contrôle, sortie-observation par la mesure*, état- fonction d'onde, l'état définit les valeurs des observables, l'état peut être déterminé à partir des mesures (tomographie quantique), la mesure* exerce une rétroaction sur la préparation en modifiant l'état.

BOLTZMANN (CONSTANTE DE)

BORN (règle de)

Règle d'interprétation proposée par Max Born* selon laquelle le carré de la fonction d'onde* (en fait le produit de la fonction d'onde par sa fonction complexe conjuguée) représente la probabilité de trouver le système dans la configuration spécifiée par les coordonnées. Pour une particule la probabilité de se trouver au point spécifié par la variable position ou avec le moment spécifié par la coordonnée moment.

Que le produit scalaire* de l'état par lui même représente une probabilité* est l'épine dorsale de l'interprétation probabiliste de toute la mécanique quantique.

BOSE-EINSTEIN (CONDENSATION DE)

Phénomène se produisant dans un ensemble à nombre donné de bosons au dessous d'une certaine température lorsque l'ensemble se comporte comme une seule particule caractérisée par un état quantique. Les bosons s'accumulent dans l'état de plus basse énergie et il apparait une manifestation quantique à l'échelle macroscopique.

C'est un phénomène quantique se produisant dans un système de grand nombre de bosons, lorsque pour une température inférieure à une température de dégénérescence une partie des particules se retrouve dans un état d'impulsion nulle.

Le terme de condensation vient d'une analogie de ce phénomène avec la condensation d'un gaz dans un liquide, quoiqu'il s'agisse de phénomènes totalement différents, puisqu'il se produit ici dans l'espace des impulsions* et que la distribution des particules dans l'espace des positions n'est pas modifiée.

La théorie de ce phénomène a été faite par Einstein en 1925 et développée par London* en 1938.

Il aura fallu attendre 1995 et les techniques de refroidissement atomique* pour observer la condensation sans ambiguïté sur des atomes de rubidium.

La condensation de Bose Einstein provoque une cohérence quantique de l'onde de De Broglie sur des échelles macroscopiques. On peut dire qu'il apparaît une onde de matière où un nombre macroscopique d'atomes se trouvent tous décrits par la même fonction d'onde.

La condensation de Bose Einstein se produisant dans un gaz idéal est due aux propriétés de symétrie de la fonction d'onde des particules (statistique de Bose-Einstein) et non pas à l'interaction entre elles. La transition vers un état superfluide n'est pas une telle condensation car le phénomène de suprafluidité* dépend de manière essentielle de l'interaction entre les atomes.

Lors de la condensation il se produit une brisure spontanée de symétrie liée à l'invariance de l'hamiltonien* du système par rapport aux transformations de jauge* ; l'état condensé n'est pas un invariant de jauge.

La supraconductivité* peut être considérée comme résultant d'une condensation de ce type pour des paires d'électrons corrélés de Cooper avec des directions opposées des impulsions et du spin.

Le mode d'action d'un laser* peut être considéré comme une condensation de Bose-Einstein de photons*. Une application serait la réalisation de lasers à atomes, c'est-à-dire d'instruments capables de délivrer un faisceau d'atomes se trouvant tous dans le même état, à l'instar des photons d'un rayon laser.

Il y a de nombreux autres exemples où intervient la condensation de Bose-Einstein, ce qui en fait un concept universel de la théorie quantique.

BOSE-EINSTEIN (STATISTIQUE DE)

BOSON

BOSON DE HIGGS

Quanta du champ de Higgs* décrivant les excitations de ce champ. Particule élémentaire* massive de spin nul hypothétique, actuellement recherchée. Son existence est impliquée par le mécanisme

de brisure spontanée de la symétrie*électrofaible* imaginé par Brout, Englert et Higgs.

Le boson de Higgs est une particule prédite par le fameux modèle standard* de la physique des particules élémentaires. Elle constitue en quelque sorte le chaînon manquant et la pierre d'achoppement de ce modèle. En effet, cette particule est supposée expliquer l'origine de la masse de toutes les particules de l'Univers (y compris elle-même !), mais en dépit de ce rôle fondamental, elle reste encore à découvrir puisque aucune expérience ne l'a pour l'instant observée de façon indiscutable.

Interrogé à l'annonce par le CERN d'une observation de phénomènes pouvant correspondre à ce fameux boson, son inventeur avec Brout, Englert a déclaré : *« C'est une question d'esthétique. Mon métier de théoricien de la physique a notamment été de trouver de belles explications à des phénomènes inexplicables. Vous savez, tout n'est pas toujours très beau dans la nature, du moins d'un point de vue esthétique. Proposer un mécanisme simple et logique, c'est donc une question d'esthétisme scientifique. C'est dans ce cadre que se place notre invention du boson scalaire »*

On mesure là la distance qui sépare la physique théorique de la physique expérimentale. La trace du boson de Higgs ne constitue pas à elle seule le boson de Higgs . Découvrir une particule élémentaire dans la zone où l'on s'attend à trouver ce fameux boson n'exclut pas que l'on ait découvert une autre particule. Le « boson de Higgs » reste à identifier.

Le raton laveur* rappelle à ce propos, devant le déferlement médiatique provoqué par l'annonce du CERN :

1. On est sous le couvert de la mécanique quantique qui n'a pas la prétention de décrire ce qu'est une particule élémentaire*. Seules des observations macroscopiques sont prises en compte. L'onde de de Broglie* reste mystérieuse. Ce fait majeur est oublié par la communauté des physiciens qui aurait tendance à avaliser la remarque de Dyson* en 1953 : *« Quantum electrodynamics gives us a complete description of what an electron does; therefore in a certain sense it gives us an understanding of what an electron is »*.
2. On se trouve en théorie quantique des champs* obtenue par quantification* des modes normaux*, soit la mise en place d'oscillateurs harmoniques fictifs. C'est dans cette représentation qu'apparaissent les notions de quanta* et de vide quantique*. On a mathématisé l'hypothèse de Planck. Einstein croyait au photon*, Planck n'y croyait pas.

3. On identifie quanta (bosons*) et particules élémentaires*. Les interactions fondamentales se racontent comme des échanges de particules virtuelles* dans le vide. Des infinités apparaissent dans la théorie et sont éliminées par une procédure ad hoc, la renormalisation*.
4. Pour unifier (pourquoi donc ?) les interactions fondamentales on les exprime dans un langage commun, en introduisant un objet géométrique abstrait. C'est la théorie de l'invariance de jauge* et des champs de jauge*(connexions sur un fibré vectoriel). Mais en tant qu'objet géométrique le champ de jauge ne comporte aucune masse.
5. On introduit alors (un épicycle de plus ?) un champ supplémentaire pour déstabiliser le champ de l'interaction faible. Le champ de Brout , Englert et Higgs. Le boson de Higgs est le quanta* de ce champ. Après tant de fictif, de virtuel et d'abstrait on prétend l'observer. Et si c'était « Comme si » ? Observer suppose toujours un modèle*.
6. Mais pourquoi faut-il alors remplir tout l'espace d'une substance* qui fasse écran aux interactions ?. Une substance liée au boson de Higgs qui explique pourquoi les interactions électromagnétiques et faibles sont si différentes à nos yeux. Est-ce une nouvelle résurgence de l'éther ? Il ne s'agit donc pas d'une particule comme les autres, mais de la véritable pièce maitresse de tout ce que nous savons aujourd'hui sur la matière. Avons nous atteint ce stade de la connaissance?
7. Il faut bien se convaincre de la séparation qui existe entre modèle mathématique et observations expérimentales. Tout dans un modèle mathématique n'a pas une réalité physique observable. Le champ de Higgs n'est pas un champ observable et ne décrit certainement pas un processus dynamique dans l'univers. Toute cette « histoire » de « mécanisme » n'est qu'un changement de représentation de la théorie, un simple rebattage de cartes. Le mécanisme de Higgs existe-t-il ? Une particule ne fait pas le printemps.

BOSONS INTERMEDIAIRES

Particules de spin 1 responsables de l'interaction faible*. Prédites par la théorie elles ont été découvertes en 1983 au CERN*.

BOUCLAGE

BOULANGER (TRANSFORMATION DU)

BOURBAKISME

Esprit mathématique d'un groupe de mathématiciens français dénommé « Bourbaki* », fondé en 1935, qui a contribué à changer la face des mathématiques dans les années 1950-1970.

Bourbaki n'a pas inventé des techniques révolutionnaires ou démontré des théorèmes grandioses, ce n'était pas son objectif. A travers son traité collectif « Eléments de mathématique » il a apporté une vision renouvelée des mathématiques, une profonde réorganisation et clarification de leur contenu, une terminologie et une notation bien pensées, un style particulier.

A travers sa diffusion dans l'enseignement supérieur français il a contribué à créer un esprit des « mathématiques modernes », présent par ailleurs aux USA ou en URSS, fondant les mathématiques sur la logique* et la théorie des ensembles* et privilégiant l'axiomatique* et la mise en valeur des structures algébriques*. Le bourbakisme a cherché à algébriser l'analyse en révélant les structures. Le terme de bourbakisme renvoie ici au « projet Bourbaki », qui consistait, en dégagant les structures profondes des mathématiques, à obtenir le degré de généralité donnant à une théorie sa puissance extensive

L'extension de ces nouveaux points de vue formalistes à l'enseignement secondaire a suscité dès les années 70 une profonde opposition et un mouvement de retour au concret, en particulier dans l'enseignement de la géométrie. Ceci correspond d'ailleurs à une réévaluation fondamentale de la nature des mathématiques dans ces années là. A l'hégémonie bourbakiste qui accentuait une conception structurelle et axiomatique de la mathématique pure, isolée de ses applications et des besoins de la société, se substitue une mathématique plus utilitaire, en particulier dans la théorie des systèmes dynamiques*.

L'approche utilitariste a succédé à la vision des mathématiques comme une science propre, concrétisée par l'introduction des « maths modernes » dans l'enseignement. Du point de vue de la discipline, les « maths modernes » ont été une réussite indéniable : les succès actuels de l'Ecole Française de mathématiques sont largement dus au niveau de l'enseignement datant de cette époque.

Le bourbakisme n'en reste pas moins un point de vue de référence essentiel, associé au structuralisme*.

BRISURE DE SYMETRIE ET MORPHOGENESE

BRISURE SPONTANEE DE SYMETRIE. (Cf. SYMETRIE Brisure spontanée de)

BRUIT

De l'usage populaire courant à l'usage savant, la notion de bruit désigne toujours un phénomène qui s'oppose à la perception d'un phénomène d'ordre. D'un point de vue physique général, un bruit est un signal aléatoire*, c'est à dire une grandeur physique qui varie au hasard avec le temps.

Dans le domaine acoustique il s'agit de sons inorganisés qui empêchent de saisir la régularité musicale ou de comprendre le sens d'un discours. D'une manière très générale on appelle bruit tout phénomène qui vient troubler la génération et la transmission d'un signal, et brouiller la perception de l'information contenue dans ce signal.

Le bruit est de ce fait considéré comme un phénomène nuisible et il semble naturel de chercher à s'en débarrasser par tous les moyens. L'expérience prouve que si le bruit peut souvent être réduit, il est rare qu'il puisse être totalement supprimé. L'expérience prouve aussi que sa suppression totale n'est pas aussi souhaitable qu'il pouvait y paraître. L'être humain, par exemple, vit avec bonheur dans un environnement où se manifestent des bruits légers. Le silence total provoque rapidement angoisse et déstabilisation psychologique, d'où son usage constant comme procédé raffiné de torture.

On saisit là l'ambiguïté du bruit, nuisible et utile à la fois. C'est cette ambiguïté qui en fait la richesse et qui fait l'objet au XXème siècle d'une formulation scientifique, bien loin d'être achevée. Le bruit est à la fois ce qui brouille l'information et s'avère lui même porteur d'information.

Ainsi le bruit et le vide ont en commun d'être à la fois le rien, l'absence d'ordre ou de matière, et de pouvoir devenir, le tout, ce par quoi l'ordre ou la matière accèdent à l'existence.

Sans bruit nous n'existerions pas, car les réactions chimiques ne se déroulent qu'en présence de bruits thermiques. La vie n'apparaît

que grâce aux incessantes variations microscopiques de l'état de la chaleur.

Sans bruit le ciel ne serait pas bleu et notre vie se déroulerait sur un fond obscur ou hyperbrillant. Car le bleu du ciel vient de ce que l'agitation désordonnée des molécules de l'air atmosphérique, le bruit de l'air, modifie la lumière qui nous arrive du soleil.

Dans l'évolution du concept de bruit du négatif au positif, on peut voir un parallélisme avec l'évolution historique du concept de hasard*, de l'ignorance* à l'objectivité*. L'irrégularité n'est pas forcément un obstacle à la connaissance, mais constitue en fait souvent un allié précieux dans la création des phénomènes stables du monde. L'irrégularité n'est pas une marque des limitations de notre connaissance.

Tout l'univers regorge de bruits. C'est là sans doute une des découvertes les plus fondamentales de notre temps.

Du microscopique au cosmologique, en passant par le biologique, tous ces bruits trahissent les mécanismes fondamentaux à l'oeuvre dans l'Univers.

La Science Contemporaine se veut à l'écoute de ces bruits. Murmures ou gazouillis du Cosmos*.

Le bruit est constitué de fluctuations* désordonnées de diverses grandeurs physiques de nature très différente. Le bruit est considéré comme une perturbation nuisible à la perception des signaux et de l'information qu'ils transportent. Mais loin d'être seulement un parasite à éliminer, le bruit est lui-même un signal au cœur même de la plupart des phénomènes physiques, constituant un "Comme ça" incontournable et révélateur. C'est par le bruit que les atomes (bruit du mouvement brownien*) les électrons (bruits des courants électriques) ou bien encore les canaux des membranes nerveuses (bruit des courants ioniques) manifestent leur existence. De par son enracinement dans les structures de la matière le bruit est le garant de l'objectivité* du hasard*.

Certains voudraient distinguer le bruit, d'origine physique indéterminée d'un ensemble pseudo-aléatoire* engendré par un algorithme précis. Dans la pratique phénoménologique cette distinction entre le hasard* pur et le pseudo-aléatoire* est délicate.

La Physique Quantique est en un sens un témoignage éclatant des manifestations d'un bruit universel, le Bruit Quantique* dont les fluctuations du Vide* sont le paradigme même.

BRUIT QUANTIQUE

BULLES (Chambre à)

CADAVRES DANS LE PLACARD

Ce sont des problèmes soulevés par la physique et qui n'ont pas reçu une vérification expérimentale ou une solution satisfaisante. Certains de ces problèmes mettent en jeu des entités ou des phénomènes qui n'ont jusqu'à présent jamais été observés.

On constatera non sans surprise que la liste est longue. Du monopôle magnétique* et de la masse du neutrino* au boson de Higgs* et aux quarks*. Sans parler des cordes*. Des actions avancées* et de l'irréversibilité* contraire à la symétrie temporelle des équations fondamentales, aux tachyons* et aux ondes gravitationnelles*. De l'éther* aux trous noirs*. De la matière noire* de l'univers aux univers multiples*.

Et tout ceci sans parler du statut de la mécanique quantique et des univers subquantiques* imaginés par certains.

La physique contemporaine est vivante et déconcertante dans son audace. Bien des surprises nous sont réservées mettant en cause nos théories fondamentales.

CALCUL

Application de règles d'opération avec des objets quelconques, nombres* ou fonctions*.

Système déductif fondé sur des axiomes* et des règles de déduction d'un élément à partir d'un autre.

CALCULABILITE

CALCULATEUR ELECTRONIQUE

CALCULATEUR QUANTIQUE (Cf. Information quantique*)

CALCUL DIFFERENTIEL (ou calcul infinitésimal ou analyse infinitésimale)

Partie des mathématiques consacrée à l'étude des fonctions* à l'aide de leurs dérivées*.

Cette discipline est issue de travaux de Newton* et de Leibniz*. Ils ont montré le caractère réciproque entre les dérivées* et les intégrales*. Calcul différentiel et calcul intégral forment l'analyse infinitésimale. Sa création marque une ère nouvelle dans l'histoire des mathématiques. Elle pénètre dans l'ensemble des disciplines mathématiques.

CALCUL VECTORIEL

Un vecteur* est un ensemble de nombres, mais c'est aussi un objet géométrique selon la dualité entre nombres et figures chère à Descartes*.

Le calcul vectoriel est un calcul sur les vecteurs où l'on n'utilise que la représentation géométrique. Ainsi la somme de deux vecteurs, au lieu de s'exprimer par la somme des nombres coordonnées de même rang, s'exprime par une construction géométrique, comme la diagonale d'un parallélogramme construit sur les deux vecteurs (parallélogramme des forces). De même le produit scalaire* de deux vecteurs s'exprime directement comme le produit de la longueur d'un des deux vecteurs par la longueur de la projection de l'autre vecteur sur le premier.

Un champ* de vecteur est la donnée d'un vecteur en chaque point (xyz) de l'espace, soit un vecteur dont les composantes sont des fonctions de ces variables. Les dérivées partielles de ces composantes permettent de définir une quantité scalaire, la divergence, et une grandeur vectorielle le rotationnel. Gradient*, divergence et rotationnel trouvent un très large emploi dans la formulation des théories physiques, en particulier la théorie électromagnétique ou l'hydrodynamique. Il y'a là un calcul vectoriel différentiel que l'on peut symboliquement représenter à l'aide du « nabla » (Cf. Gradient*). Les mathématiques* sont une constante définition d'objets nouveaux et du calcul avec ces objets.

CANAL

CANAL IONIQUE

CARTESIANISME

C'est le nom appliqué à la doctrine de Descartes* et à la tradition philosophique qui en découle. Le cartésianisme est un dualisme* et un rationalisme*. La dichotomie corps-esprit qui y

prévaut est un idéalisme* dans le domaine spirituel et un matérialisme dans le domaine physique.

Descartes, savant et philosophe, est le fondateur du rationalisme objectif moderne. Après que Galilée, eut peu auparavant proclamé l'objectivité de la nature mathématisée, Descartes conçut la nouvelle idée de la philosophie universelle, et lui donna un tour mathématique et physique. Une philosophie en tant que mathématique universelle. Une idée reprise par Leibniz*, et qui domine toute l'activité de la science moderne, jusqu'à nos jours.

Mais dans le but de fonder ce rationalisme, il instaure l'esprit comme donneur de sens à la place de la nature. Le fameux « Je pense, donc je suis » va marquer les esprits avant que la neurologie* contemporaine ne le renverse, « Je suis, donc je pense ». Descartes inaugure une critique de la connaissance* par l'établissement de la primauté de la raison*. Mais en proclamant le dualisme res-extensa, res-cogitans il ouvre la voie à de riches discussions philosophiques. La physique cartésienne, contrairement à la physique newtonienne*, considère comme matière tout ce qui a une étendue et décrit le mouvement à l'aide de la notion de « tourbillons ». Cette physique s'exprimera par la suite dans la théorie des actions par contact*.

En fait Descartes « laisse tomber » la substance* aristotélicienne (ousia et hylé). La substance* serait chez lui identique à la « res cogitans ». Sa matière* est purement conceptuelle, même dans sa physique. C'est plutôt Descartes que Galilée qui se trouve à l'origine du platonisme* scientifique qui aboutira à la mécanique quantique*.

CASIMIR (EFFET)

CATALYSEUR

CATASTROPHES (THEORIE DES)

Les catastrophes sont des variations discontinues apparaissant comme des réponses soudaines d'un système à une variation continue des conditions extérieures ou des paramètres. Il y a catastrophe dès qu'il y a discontinuité phénoménologique. La théorie des catastrophes repose sur la mise en évidence d'une géométrie sous-jacente aux phénomènes critiques* dans leur ensemble.

Les sources de la théorie des catastrophes sont :

La théorie des singularités des applications différentielles de Whitney, qui est une généralisation

grandiose de l'étude du maximum et du minimum des fonctions, aux fonctions à plusieurs variables.

La théorie de la bifurcation des systèmes dynamiques* de Poincaré* et Andronov*. Le mot bifurcation signifie dédoublement et s'utilise en un sens large pour désigner toutes les réorganisations qualitatives possibles ou les métamorphoses de différents régimes dynamiques lors de la variation des paramètres dont ils dépendent.

La théorie des singularités consiste en la mise en évidence et en l'étude détaillée d'un ensemble restreint de singularités standard les plus souvent rencontrées, toutes les singularités plus complexes se réduisant à celles ci par de petites modifications. Etudiant certaines classes de fonctions relativement simples, Whitney a établi que le nombre de types possibles de singularités n'est pas très élevé. Il a établi que des singularités comme les plis et les fronces ne disparaissent pas par petites perturbations et que toutes les singularités plus complexes se résolvent en plis et fronces.

C'est le mathématicien français René Thom qui a créé la dénomination de théorie des catastrophes, à partir de recherches pour une description mathématique des champs morphogénétiques* en biologie, où il reprend des idées introduites en biologie théorique* par C.H. Waddington. Son objet n'est pas tout à fait défini. Thom la considère comme un état d'esprit et non comme une théorie au sens ordinaire. Il en attendait une renaissance de la philosophie naturelle*.

La théorie des catastrophes décrit et définit les accidents de l'évolution d'un système qui font que la description utilisée jusqu'à cet accident devient caduque et doit être brusquement remplacée par une autre. Elle cherche à caractériser les configurations de conflit, en particulier comment un attracteur* structurellement stable* peut cesser d'être stable, ce qui est l'objet de la théorie des bifurcations. Le premier but de la théorie est de classer les accidents morphologiques structurellement stables* qui interdisent la description quantitative continue d'un système. La théorie associe les accidents morphologiques à un conflit entre des régimes d'évolution stables.

On peut se limiter à des évolutions commandées par une fonction potentiel* qui définit des lignes de force. Les attracteurs stables sont alors les minima du potentiel et le problème de la classification des catastrophes peut être totalement résolu. La théorie des catastrophes

élémentaires associe les configurations de conflit aux points singuliers de la fonction potentiel.

Thom a distingué 7 types de catastrophes élémentaires (archétypiques) pour un système dépendant de quatre paramètres : le pli*, la fonce*, la queue d'aronde, le papillon, l'ombilic hyperbolique, l'ombilic elliptique, l'ombilic parabolique.

Juste retour à Héraclite qui faisait du conflit le père de toute chose et à tous ceux pour lesquels la source du mouvement* est dans l'unité et le conflit des contraires, propres à la matière elle-même, dans le jeu des attractions et des répulsions (forces*) présentes au cœur de tout événement physique.

De par son enracinement dans le mouvement* la théorie des catastrophes prend des allures d'aristotélisme*, tout en sacrifiant au platonisme* par le caractère géométrique universel des catastrophes élémentaires. Selon Thom, le grand mérite (et le grand scandale !) de la théorie des catastrophes a été de dire que l'on pouvait produire une théorie des accidents, des formes, du monde extérieur, indépendante du substrat, de sa nature matérielle. La physique moderne s'est développée comme une physique quantitative des forces excluant toute physique qualitative des formes, ce qui est le sens de la rupture galiléenne avec la tradition aristotélicienne. La théorie des catastrophes ouvre la voie à une synthèse entre le physicalisme* post galiléen et l'hylémorphisme* aristotélicien.

Il n'y a aucune raison de penser que la force ait en principe un statut ontologique plus profond que celui de la forme. L'analyse morphologique peut être plus révélatrice qu'une analyse en terme de force.

La théorie des catastrophes a été appliquée à l'optique géométrique et à l'optique physique, à l'hydrodynamique, à la stabilité des navires, à l'étude des battements cardiaques, à l'embryologie, à la sociologie, à la linguistique, à la psychologie expérimentale, à l'économie, à la géologie, à la théorie des particules élémentaires, à la modélisation de l'activité cérébrale et psychique.....

Elle peut sembler une science carrefour et constituer une vision du monde, c'est ce qui fait son aura.

La théorie des catastrophes est apparue historiquement avant la théorie du chaos déterministe* et la théorie des fractals*, ainsi que des conceptions nouvelles sur l'origine des formes* liées aux conceptions de l'auto-organisation*. Elle participe aujourd'hui à un paysage général de la morphogénèse*.

Thom lui-même a continué ses recherches en biologie théorique*, en sémiotique* et en philosophie générale, et a proposé un cadre

commun pour les théories de la nature, de l'esprit et des signes qu'il appelle la « sémiophysique* ».

En 1991 René Thom déclare : « Sociologiquement on peut dire que la théorie des catastrophes a fait un naufrage subtil, parce que la plupart des notions que j'ai introduites ont pénétré dans le langage ordinaire des modélisateurs. Alors, il est vrai que, dans un sens, les ambitions de la théorie ont fait naufrage, mais, la pratique, elle a réussi ». Avec la théorie des catastrophes Thom a eu l'immense mérite, partagé avec Steve Smale, de montrer l'usage de la topologie* dans la modélisation des phénomènes naturels, et en particulier des systèmes dynamiques*.

CATEGORIE

CAUSALITE

Principe d'interprétation physique du déterminisme*, considérant comme cause un évènement permettant la connaissance d'un évènement futur apparaissant ainsi comme un effet. La causalité est un transfert d'information.

Doctrines philosophiques et scientifiques affirmant l'existence de causes* pour tout phénomène. Leibniz a dit : " Rien n'arrive sans qu'il y ait une raison suffisante pourquoi il arrive et pourquoi ainsi plutôt qu'autrement". La causalité affirme l'absence d'influence d'un évènement sur tous les évènements qui l'ont précédé dans le temps* et sur tous les évènements qui se produiraient à des distances dans l'espace, telles que le temps nécessaire pour transmettre un signal d'un point à l'autre soit plus grand que le temps qui sépare les deux évènements. D'après la relativité* aucune cause ne peut avoir d'effet instantanément à distance. Il n'en reste pas moins que certains philosophes et certains physiciens évoquent des cas où se manifesterait une rétro causalité* avec l'effet précédant la cause.

Pour le physicien le concept de causalité a certaines implications. La première est la localité*. Toutes les théories existantes de la causalité comportent des forces qui agissent en des points de l'espace. L'action de champs locaux comme en électromagnétisme satisfait à ce principe. Il y a eu de nombreuses tentatives pour éliminer ce concept de champ local, mais toutes ces théories ont des difficultés comme la propagation d'effets qui remontent le temps (retrocausalité*).

D'après la mécanique quantique aucune cause ne peut avoir d'effet si elle ne met pas en jeu au moins un quantum* élémentaire

d'action* égal à la constante de Planck*. Voilà un phénomène profond révélant par un effet de seuil le caractère intrinsèquement non linéaire* de l'univers microphysique.

Une corrélation* n'implique pas une relation de causalité. Confusion trop courante !

Dans le cas des corrélations quantiques* à grande distance, des corrélations* subtiles existent entre particules éloignées, mais ceci n'implique pas un lien causal entre elles, car il n'existe aucun transfert d'information. Il faut cependant préciser que ces corrélations n'apparaissent que si les particules se trouvaient auparavant dans un état enchevêtré* à courte distance, ce qui est la cause des corrélations.

A une certaine simplicité schématique de la notion de cause en physique se superpose une complexité enchevêtrée de la notion de cause pour les systèmes complexes, en particulier les systèmes vivants.

CAUSA SUI

Conception de quelque chose qui peut être sa propre cause. Cette idée apparaît chez Descartes* et chez Spinoza*, qui la définit comme ce dont l'essence* implique l'existence*, ou bien ce qui ne peut qu'exister par nature. C'est l'idée médiévale de ens a se , d'existence en soi sans cause extérieure.

Cette idée d'autonomie d'existence resurgit dans les conceptions contemporaines d'auto-organisation* et d'auto-poïèse* et d'une manière générale dans les discours sur les origines qui privilégient l'autonomie du développement, comme dans certaines théories cosmologiques*.

CAUSE

Toute raison* d'un phénomène.

Aristote distinguait quatre types de causes : la cause matérielle (la substance en jeu), la cause formelle (la forme de l'événement), la cause efficiente (les acteurs qui produisent l'événement) et la cause finale (ce vers quoi l'événement tend).

La physique moderne aurait voulu éliminer la cause formelle ou forme substantielle* mais elle n'y a pas réussi car elle s'avère incapable de réduire tous les phénomènes à leurs principes les plus profonds. Les figures et mouvements ultimes nous échappent.

La physique écarte à priori toute idée de cause finale ou de finalité*. L'emploi des principes variationnels*, nés dans une atmosphère métaphysique a pu laisser croire à l'existence d'une finalité, alors qu'il n'y a aucune place pour elle dans des théories où le déterminisme impose tout. Les cosmologistes qui défendent le « principe anthropique »* flirtent cependant avec l'idée de finalité*.

La finalité* prend aujourd'hui un nouveau visage dans l'élaboration de la conception du rapport entre le Tout* et les parties, de la rétroaction*, des niveaux de réalité* et de l'émergence* à travers la reconnaissance des causes descendantes*.

Il existe des relations entre la symétrie des causes et la symétrie des effets* étudiées par Pierre Curie, établissant qu'un effet est au moins aussi symétrique que sa cause.

CAUSE DESCENDANTE

Le réductionnisme* suppose que le comportement d'un système est complètement déterminé par le comportement des parties, des éléments ou des sous systèmes. Si vous connaissez les lois gouvernant les parties, vous connaissez les lois gouvernant le système.

La théorie des systèmes prend le contrepied du réductionnisme en considérant des cas où le Tout* est plus que la somme de ses parties. Le Tout a des propriétés émergentes* qui ne peuvent être réduites aux propriétés des parties.

La causalité descendante est l'inverse du principe réductionniste. On envisage que le comportement des parties puisse être déterminé par le comportement du système global. En fait le global surgit avec les contraintes des parties, mais le global impose des contraintes aux parties.

Ceci est parfaitement illustré par un cristal qui provient des interactions moléculaires, mais qui de par sa formation impose une position stricte aux molécules constituantes.

Soit un système dynamique* où les lois de la dynamique exercent des contraintes sur les trajectoires* dans l'espace de phase*. Cette dynamique détermine souvent des attracteurs*, soit des régions de l'espace de phase où le système peut pénétrer sans pouvoir le quitter. L'état initial du système détermine l'éventualité de l'atteinte d'un

attracteur, mais une fois l'attracteur atteint l'état du système est strictement limité, ses trajectoires ne quittent plus l'attracteur.

Il est des cas où la causalité normale s'exprime beaucoup plus difficilement que la causalité descendante. Prenons ainsi une protéine dont on connaît la structure primaire ; celle-ci détermine les structures secondaires et tertiaires. Mais l'obtention de celles-ci par l'étude de surfaces de potentiel se trouve souvent en échec de par l'existence de très nombreux minima locaux. Mais une fois ces structures établies ou réalisées dans un organisme, les positions des atomes sont définies avec précision et contraintes par les structures globales.

La notion de causalité est donc plus subtile qu'il n'y paraît au premier abord.

CELLULE

Tous les organismes vivants sont composés de cellules. La cellule est pour la biologie ce que l'atome est pour la physique ou la chimie. La nature est pour ainsi dire alphabétique et non pas idéographique.

Les bactéries (prokaryotes) ont une seule cellule limitée par une ou plusieurs membranes*.

Les eukaryotes ont une ou plusieurs cellules, comportant chacune un noyau contenant le matériel génétique*, entouré du cytoplasme. Celui-ci peut comporter différents compartiments, chacun limité par une membrane. Ces compartiments ont des fonctions différentes. La plus grande partie du cytoplasme, le cytosol, effectue la synthèse des protéines et est le siège du métabolisme. Le cytosol regorge de membranes comme le reticulum endoplasmique ou l'appareil de Golgi. La mitochondrie avec sa double membrane est le siège de la production d'énergie. Dans le détail, l'organisation de la cellule s'avère d'une grande complexité, assurant la multitude de ses fonctions.

La forme de la cellule est déterminée par un cytosquelette formé de réseaux de fibres protéiques, dont on distingue trois classes : les filaments d'actine, les microtubules et les filaments intermédiaires.

La manière dont la cellule se divise en engendrant des cellules analogues ou différentes, la manière dont toute l'organisation se réorganise, reste un des grands mystères de la biologie.

La présence du matériel génétique est le caractère essentiel du noyau. Lorsqu'une cellule se divise (mitose) ce matériel apparaît sous forme de particules filiformes, les chromosomes. Entre cellules mères

et cellules filles les chromosomes se distribuent également et se réorganisent progressivement de manière à assurer l'hérédité* selon les lois de Mendel.

Lorsque la cellule fut découverte (1838), elle ne semblait guère autre chose qu'une sorte d'alvéole de vie. Mais on découvrit progressivement que cette petite chose était un être vivant complet et, à l'état unicellulaire, autonome. On se rendit de plus en plus compte que cet être vivant de base n'avait rien d'élémentaire, mais constituait un micro-organisme comportant des micro-organes fonctionnellement différenciés et spécialisés. Le microscope électronique devait enfin révéler que ce micro-organisme était un microcosme comportant par milliards des molécules individualisées, que les micro-organes ou organites étaient le siège d'opérations transformatrices, fabricatrices, communicatrices, informatrices. La biologie moléculaire fut l'opératrice de ces ultimes, fabuleuses et capitales découvertes. Animée par l'esprit réducteur, elle pouvait enfin révéler sans conteste que tous les processus vitaux étaient en fait des processus physico-chimiques. Elle démontrait qu'il n'y avait pas de matière vivante. Mais elle démontrait par là même qu'il y avait des systèmes vivants, des machines vivantes, des êtres vivants, donc de l'autonomie* vivante.

CERCLE DE VIENNE

Groupe constituant le noyau idéologique et organisationnel du positivisme logique*. Ce groupe est né à la suite d'un séminaire organisé en 1922 par Moritz Schlick à l'université de Vienne, et réunissant de jeunes philosophes à culture scientifique et de jeunes scientifiques intéressés par la philosophie, adoptant une attitude commune positiviste*. Ils cherchaient à réévaluer l'empirisme à la lumière des connaissances scientifiques modernes. Groupe informel se considérant l'héritier de la tradition empirique viennoise du XIX^e siècle représentée par Boltzmann* et Mach*. Le plus connu de ses membres, son leader en quelque sorte, est Rudolf Carnap*. Hans Reichenbach* s'y rattachait à Berlin.

Ce groupe avait en commun une position de refus de la métaphysique, comme doctrine dont les assertions ne peuvent être vérifiées par l'expérience. Il défendait des idées proches du scientisme*. Il s'est dissous dans les années 30 tout en migrant vers l'Amérique où il constitua la base de la philosophie analytique*.

CERTITUDE

CERVEAU

Le cerveau est un organe, siège de toutes les activités régulatrices de l'organisme, des activités perceptives et cognitives. Il est responsable de la conscience*. Il est le centre directeur du système nerveux.

C'est un organe complexe, dont la description révèle une multiplicité de zones, auxquelles on tente parfois de rattacher des fonctions spécifiques. Il y'a un cerveau droit et un cerveau gauche aux activités distinctes et complémentaires.

Les localisations cérébrales tendraient à favoriser une image du cerveau comme ordinateur alors que sa structure comme réseaux de neurones* est en faveur d'une conceptualisation comme système analogique biochimique. La révolution des systèmes dynamiques atteint les études sur le cerveau, dont le fonctionnement serait pris en compte par la dynamique non linéaire. L'activité du cerveau serait alors décrite en terme d'attracteurs*, d'états transitoires*, de stabilité*, de bifurcations* et de chaos*.

Les travaux récents sur la visualisation du cerveau en activité ont permis d'établir des liens fonctionnels qui mettent en évidence l'activation de certains centres lors d'activités émotionnelles ou cognitives. Mais ces fonctions ne peuvent être représentées comme des formes statiques et doivent résulter de la neurodynamique.

Il n'est plus seulement possible, par l'imagerie *structurelle* (IRM, scanner X), de produire des images « anatomiques » ou statiques très précises des structures cérébrales (matière grise et matière blanche) et, par là-même, de localiser des lésions cérébrales pour en poser le diagnostic et en déterminer les suites chirurgicales éventuelles. On peut désormais observer *in vivo* le cerveau engagé dans des activités cognitives telles que, par exemple, celle de perception visuelle et obtenir, en quelque sorte, des cartographies du cerveau en fonctionnement. En règle générale, la méthode est simple : on fait effectuer une tâche cognitive à un individu, et l'on mesure le signal produit par l'activité cérébrale. Selon les techniques et les outils mathématiques employés, on peut alors retrouver avec plus ou moins de précision, quelle région du cerveau était particulièrement active à tel ou tel moment de la tâche cognitive. En partant du principe que le cerveau n'est pas un organe homogène mais qu'il s'organise plutôt en régions spécialisées dans telle ou telle fonction, on peut, grâce à l'IRMf par exemple, montrer l'activité de ces différentes structures, non pas certes en observant directement les neurones (il est aujourd'hui impossible de descendre à cette échelle), mais en prenant au moins

indirectement en compte l'augmentation locale et transitoire du débit sanguin consécutive à l'activité de telle ou telle région. En mesurant les changements constatables dans les réponses métaboliques de sujets occupés à telle ou telle tâche cognitive, la neuroimagerie fournit donc désormais un instrument rapide, sûr, non invasif et de haute résolution, qui nous permet, en quelque sorte, de regarder notre cerveau au travail, de mieux observer et comprendre notre « espace de travail neuronal ».

Différentes méthodes de visualisation présentent des résolutions temporelles plus ou moins grandes. La tomographie par émission de positrons a une résolution faible de l'ordre de 10 secondes. L'électroencéphalographie a une résolution temporelle élevée de l'ordre de 2 microsecondes mais a une mauvaise résolution spatiale. Une des méthodes les plus utilisées, qui dépend de la concentration de l'oxygène dans le sang, l'imagerie RMN*, a une bonne résolution spatiale (1mm) et une résolution temporelle de 2 secondes, suffisante pour une analyse dynamique. Ainsi la résonance magnétique fonctionnelle est un bon outil expérimental pour la vérification et la construction des modèles de dynamique non linéaire d'activité intellectuelle du cerveau.

Par voie anatomique, à la suite de lésions ou par imagerie, on a pu définir des aires associées à certaines activités cognitives, comme l'aire V4 associée à la vision des couleurs ou l'aire V5 liée à la perception du mouvement. Mais d'autres aires peuvent intervenir dans la vision, comme l'aire V1. On constate souvent une activité globale du cerveau

CHAMP

Concept d'un espace* (de l'espace) muni de propriétés (scalaires ou vectorielles) en chacun de ses points. Un champ de vecteur est la donnée d'un vecteur attaché à chaque point de l'espace (Cf. Calcul vectoriel*).

L'idée physique essentielle du champ est l'existence de régions de l'espace possédant d'une manière latente la possibilité de manifester en chaque point une force* sur un corps d'épreuve que l'on y introduit.

L'espace* est ainsi lui même pris pour une chose sans nécessairement être rempli de quelque chose. Une théorie de champ formule les lois qui lient entre elles les propriétés aux différents points. Une formulation physique en terme de théorie de champ élimine le problème de l'action à distance* en le remplaçant par celui de la propagation de l'action de proche en proche. Le champ est comme un

milieu (éther) dématérialisé, ce qui n'exclut pas la présence d'un véritable milieu (éther).

La théorie du champ électromagnétique définit en chaque point de l'espace les forces électriques et magnétiques que l'on peut éprouver à l'aide d'une charge électrique ou d'un courant électrique tests. Les valeurs de ces forces aux différents points sont liées entre elles par les équations de Maxwell*. Dans la relativité générale* c'est la courbure* de l'espace-temps qui est considérée comme une propriété de champ, et les équations d'Einstein établissent les relations entre les courbures aux différents points.

Le champ est donc une description des relations qui s'établissent entre les phénomènes dans l'espace et le temps. La description mathématique de cette solidarité des points entre eux débouche sur des représentations géométriques et globales qui feront le succès des Théories de Relativité. Le champ est donc une manifestation globale d'un ensemble de propriétés locales. C'est ce primat du global sur le local qui s'exprime dans les théories de champ de jauge* pour toutes les forces d'interaction de la Nature.

Du point de vue de la physique mathématique* la notion de champ introduit par contraste avec la notion de particule* le concept de système à nombre infini de degrés de libertés. Cet infini a de nombreuses conséquences qui nécessitent l'utilisation de méthodes mathématiques appropriées. C'est le cas dans la problématique de la renormalisation* et du groupe de renormalisation*. C'est le nombre infini de degrés de liberté des champs quantiques qui en fait des théories à nombre variables de particules assurant la possibilité de modification du nombre de particules dans les collisions de haute énergie.

Ontologiquement, durant les deux derniers siècles, les champs ont été considérés comme des propriétés de substrats* substantiels*. Au XIX^o siècle cette substance était un éther* matériel, quoique chez Lorentz* l'éther était devenu immatériel. Cependant même après l'apparition de la relativité restreinte* Lorentz a persisté à vouloir considérer que l'éther avait une certaine forme de substantialité, quoique différente de celle de la matière ordinaire. Au XX^o siècle c'est l'espace temps immatériel qui a joué le rôle de substrat.

CHAMP ALEATOIRE

CHAMP ELECTROSTATIQUE

Région de l'espace où une particule porteuse d'une charge électrique* se trouve soumise à une force, même lorsqu'elle est au

repos. On appelle aussi cette force, **champ électrique en un point**. Une charge électrique crée un **champ électrostatique** autour d'elle.

CHAMP ELECTROMAGNETIQUE

Le **champ électromagnétique** est le champ qui exprime l'interaction entre particules porteuses d'une charge électrique ou d'un moment magnétique. Il est la réunion d'un **champ électrique*** et d'un **champ magnétique*** exigée par la théorie de la relativité restreinte.

CHAMP MAGNETIQUE

Région de l'espace où une charge électrique en mouvement, un courant électrique ou un aimant sont soumis à une force, dite aussi **champ magnétique** en chaque point. Ils sont eux mêmes créateurs d'un **champ magnétique** autour d'eux.

Un **champ magnétique** est caractérisé par son **induction magnétique***. L'un décrit le champ total (dont celui qui est éventuellement induit par la présence de matière réagissant à un champ initial) et l'autre ne décrit que ce qui est indépendant de la matière.

CHAMP MORPHOGENETIQUE

CHAMP DE HIGGS

Champ introduit artificiellement en **Théorie Quantique des Champs**, pour provoquer l'instabilité de l'état énergétique fondamental (le **vide quantique***) du **champ de jauge*** de l'interaction **électrofaible*** et la **brisure spontanée de symétrie*** à l'origine de la masse des **bosons intermédiaires*** W et Z. Le quantum de ce champ est le **boson de Higgs***. C'est un **champ scalaire (spin 0)**

François Englert et Richard Brout sont victimes d'une grande injustice. Bien que les deux physiciens belges aient coécrit le premier papier publié sur le boson scalaire en août 1964 dans la *Physical Review Letters*, c'est leur collègue écossais Peter Higgs qui a donné son nom à la particule, grâce à un article publié trois mois plus tard dans la même revue. Pour la petite histoire, une version préalable des travaux du théoricien britannique avait auparavant été refusée par le comité de lecture, qui n'avait manifestement pas bien compris leur intérêt...

C'est un autre physicien, japonais, Yoichiro Nambu, Prix Nobel en 2008 et dont les trois hommes se sont ouvertement inspirés, qui a signalé à Peter Higgs les similitudes entre ses travaux et ceux publiés peu auparavant par les chercheurs belges. Aucun de ces articles n'évoque d'ailleurs explicitement une particule. Il est plutôt question d'un champ.

CHAMP DE JAUGE (Champ de compensation locale)

Champ vectoriel assurant l'invariance des équations du mouvement par rapport à une transformation de jauge (invariance de jauge*), c. a. d. une transformation dans l'espace interne*.

La théorie des champs de jauge est la plus générale des théorie des champs, conçue dans les années 50-60 du XXème siècle, et vérifiée expérimentalement et largement adoptée dans les années 70 . Cette théorie est bâtie sur un principe unique et décrit toutes les interactions fondamentales connues : théorie des interactions fortes (forces nucléaires)-chromodynamique quantique*, théorie unifiée des interactions électromagnétiques et faibles (radioactivité*)- théorie électrofaible*, théorie de la gravitation*. Une nouvelle théorie des champs succédant à l'électromagnétisme* et à la gravitation*. Toutes ces théories ont la même structure mathématique, une structure géométrique. Un champ de jauge est « une connexion sur un fibré principal vectoriel » dont le champ électromagnétique classique offre un bon modèle. C'est en effet la première théorie axiomatique* offrant une solution de champ* au problème de l'action à distance.

Dans les théories quantiques des champs* l'état fondamental est un vide quantique*.

L'idée des champs de jauge s'est particulièrement révélée fertile dans la description de l'interaction faible* proposée par Salam* et Weinberg* en 1967-1968. Cette description rapproche l'interaction faible et l'interaction électromagnétique, mais à la place des photons qui apparaissent dans le champ de jauge de l'électrodynamique assurant l'interaction entre électrons, ils introduisent de nouveaux bosons*-particules* vectoriels (de spin 1) qui transportent l'interaction faible. Ces bosons vectoriels intermédiaires doivent avoir une grande masse, car l'interaction faible s'exerce à de très courtes distances. Il s'agit là d'une difficulté, car un champ de jauge, objet géométrique, ne peut avoir de masse. La masse dans un tel champ détruit l'invariance de jauge des équations du mouvement. C'est pour résoudre cette difficulté que l'on introduit un champ scalaire dont les bosons sont de

spin 0, le champ de Higgs*, qui rend instable la solution invariante de jauge.

CHAMP PROPRE

CHAMP QUANTIQUE (Théorie quantique des champs)

Théorie quantique générale des systèmes microphysiques à nombre infini de degrés de libertés.

Le champ électromagnétique est l'exemple d'un tel système. Sa description à tout moment nécessite la donnée de l'intensité des champs électriques et magnétiques en chaque point de l'espace, donc la donnée d'un ensemble infini de grandeurs. Au contraire la position d'une particule à chaque instant est définie par la donnée de ses trois coordonnées*.

La théorie quantique des champs est une extension de la mécanique quantique nécessitée par le besoin de rendre compte des transformations des particules entre elles, de leur création et de leur annihilation. A tout champ*, la théorie quantique des champs associe des "particules", les quanta* du champ. Elle le fait moyennant la quantification du champ*, qui transforme le champ classique en champ quantique. L'électrodynamique quantique* constitue le premier exemple d'une théorie quantique de champ, la théorie quantique du champ électromagnétique*. Dans le développement de la théorie quantique des champs un des moments clés a été la compréhension de la procédure de renormalisation* en électrodynamique quantique.

La théorie quantique des champs fait appel à un certain nombre de méthodes mathématiques, dont la seconde quantification*, qui ont été employées avec succès dans d'autres domaines comme le problème à N-corps* en mécanique quantique ou la physique statistique*. En particulier la théorie de la renormalisation* a été utilisée en théorie des transitions de phase*. C'est le fait que la théorie quantique des champs fournisse des méthodes générales d'étude des systèmes en interaction de dimension infinie qui fait qu'elles sont applicables aussi bien aux particules élémentaires* qu'à la physique statistique* des transitions de phase*. Cette large unification d'une partie de la physique est un des éléments du paysage de la physique théorique* contemporaine.

La mécanique quantique a fortement contribué à rapprocher les deux objets que sont la particule et le champ. Selon la théorie quantique le rayonnement électromagnétique est émis et absorbé par portions discrètes, les quanta* ou les photons* qui tout comme les particules ont une énergie définie ($E=h\nu$) et une impulsion ($p=h/\lambda$), ν et λ étant la fréquence et la longueur d'onde du rayonnement. D'autre part à chaque particule est associée une fonction d'onde qui est nécessaire en chaque point pour la description de la particule, ce qui donne à la particule des propriétés ondulatoires, de fréquence $\nu=E/h$ et de longueur d'onde $\lambda=h/p$, E et p étant l'énergie et l'impulsion. C'est là la situation engendrée par le dualisme onde corpuscule*.

Une des insuffisances notoires de la mécanique quantique ordinaire est de se borner à des systèmes à nombre de particules fixes. Or si elle décrit bien l'ensemble discret des états d'énergie, elle ne décrit pas du tout ce qui accompagne le passage d'un état à un autre, c.à.d. l'émission et l'absorption de photons.

Les photons ne sont pas les seuls à apparaître ou à disparaître. Une des caractéristiques générales de la microphysique est dans la transformation réciproque des particules entre elles « spontanément » ou sous l'effet de collisions. Ainsi le photon peut engendrer une paire électron-positron ; par collision entre des protons et des neutrons on peut donner naissance à des mésons* π qui peuvent eux-mêmes donner naissance à des muons* et à des neutrinos*. Il apparaît donc nécessaire d'élargir la mécanique quantique à une théorie des systèmes à nombre infini des degrés de libertés.

Ceci peut s'effectuer en donnant aux champs classiques un caractère quantique selon les préceptes de la mécanique quantique. Pour cela les grandeurs décrivant le champ sont remplacées par des opérateurs locaux. Le champ quantique c'est un opérateur nécessaire pour calculer la distribution de probabilité du champ classique en chaque point, c.à.d. de rendre compte des mesures de l'observable champ. On parle de l'opérateur de champ quantique.

Un autre aspect du champ est outre son aspect local son aspect global. On définit ainsi l'état* du champ comme le nombre de quanta du champ présents. Ceci conduit à une représentation du champ par le formalisme dit des nombres d'occupation ou seconde quantification* ?

En pratique on décompose le champ classique sous forme hamiltonienne en modes normaux* et l'on substitue à chaque mode normal un oscillateur harmonique quantique*.

On introduit ainsi un vecteur d'état multiparticulaire et des opérateurs qui transforment les vecteurs d'état les uns dans les autres en changeant les nombres d'occupation des différentes particules (quanta). On définit ainsi des opérateurs de *création* et *annihilation*, qui ajoutent ou enlèvent des particules à l'état. Ces opérateurs sont très similaires à ceux définis pour un oscillateur harmonique quantique* qui créent ou détruisent des quanta d'énergie.

La réalisation de ce programme a en particulier été obtenue par l'électrodynamique quantique*. A la fin de la quatrième édition (1958) de son très célèbre traité de Mécanique Quantique*, il juge très sévèrement les nouveaux développements de l'Electrodynamique Quantique* dus en particulier à Feynman*. Il considère qu'il n'y a là que des « règles de travail » que De Broglie qualifiera de « petites jongleries ».

L'électrodynamique quantique* a mis en place après Feynman tout un petit théâtre où s'agitent des « particules virtuelles* ». Que penser d'une théorie où les interactions physiques sont transmises par des particules virtuelles* ?.

A défaut de fondements physiques satisfaisants de la théorie quantique des champs on a cherché ces fondements dans une approche axiomatique. Mais on ne peut dire que ce soit un succès.

Récemment, qualifiant la théorie quantique des champs, Dyson* lui trouve deux aspects. Un aspect pragmatique brillant en accord avec la réalité expérimentale avec une précision stupéfiante. Un aspect théorique obscur. Après soixante dix ans de recherches aucune base mathématique n'a été trouvée pour la théorie. Du point de vue du mathématicien on peut dire que la théorie n'existe pas. C'est là un des grands paradoxes non résolus de la théorie quantique des champs.

CHAMP QUANTIQUE (THEORIE AXIOMATIQUE)

La théorie quantique des champs axiomatique est une théorie quantique des champs* construite selon la méthode axiomatique*, où tous les résultats sont obtenus rigoureusement comme conséquence d'un système unique de propositions physiques fondamentales-les axiomes. Mais comme l'a dit Wigner, si en mathématiques on axiomatise pour comprendre, en physique il faut d'abord comprendre pour axiomatiser.

Cette démarche axiomatique en théorie quantique des champs est née au milieu des années 50 quand après le succès de la théorie de la renormalisation* en électrodynamique quantique* on a placé dans la théorie quantique des champs des espoirs théoriques fondamentaux.

Les axiomes utilisés reflètent certains présupposés essentiels de la théorie des champs traditionnelle : l'invariance relativiste*, la localité* ou la causalité*, la spectralité (l'énergie de tous les états possibles doit être positive, toutes les masses des particules sont positives). Les différentes versions axiomatiques diffèrent par le choix des objets physiques initiaux.

Dans l'axiomatique de Bogoliubov* (1955) l'objet physique initial est la matrice de diffusion*, constituée par l'ensemble des grandeurs (amplitudes) qui déterminent la probabilité de toutes les transitions possibles du système de l'état avant le début de l'interaction à l'état après interaction.

Dans l'axiomatique de Wightman* (1956) l'objet physique initial est le champ quantique en interaction, généralisation du champ quantique de la particule libre. Cette approche utilise abondamment la théorie des distributions*, car le statut mathématique d'un champ quantique y est celui d'une *distribution à valeur opérateur**.

Dans l'axiomatique de Haag, Araki, Kastler et Ruelle (1957-1964) l'objet physique initial est l'ensemble de toutes les observables, ce qui entraîne une approche algébrique* de la théorie quantique des champs.

Ces théories ont obtenus de nombreux résultats mais l'intérêt pour leur développement a décliné dans les années 70 avec l'apparition de la théorie des champs de jauge* et l'application des méthodes de la théorie quantique des champs à l'étude des transitions de phase*. Il est piquant de remarquer que de nombreux auteurs de la théorie axiomatique (Wightman, Ruelle..) se sont engouffrés dans la théorie des systèmes dynamiques* qui commence à occuper le devant de la scène de la physique mathématique.

CHAMP RESIDUEL

CHAMP SELF CONSISTENT

CHAOS DETERMINISTE

Les systèmes d'équations différentielles* (systèmes dynamiques*) non linéaires peuvent posséder des solutions exceptionnellement sensibles aux conditions initiales: changer infiniment peu les conditions du début de l'évolution peut modifier du tout au tout la trajectoire. C'est ce qui se produit quand on lance un dé ou une pièce de monnaie. Cette sensibilité est liée à une perte de

mémoire plus ou moins rapide de l'évolution passée (Cf. Propriété de mélange dans Théorie qualitative des systèmes dynamiques*). La solution instable* a un caractère d'irrégularité tel, que quoiqu'elle soit observable dans son déroulement, elle s'avère rebelle à toute description simplifiée (expression explicite de la dépendance fonctionnelle au temps, dite non intégrabilité* des équations différentielles) et par là même mal prédictible (prédiction*). La seule manière de connaître la valeur parfaitement définie de la solution à un instant donné consiste à engendrer la solution pas à pas jusqu'à l'instant considéré, à condition de ne pas perdre de précision à chaque pas, ce qui est pratiquement impossible.. Il n'existe aucun raccourci calculatoire. Ces solutions irrégulières sont dites "chaotiques" et leur existence est appelée "chaos déterministe". Bien qu'elles correspondent à une évolution parfaitement déterministe et qu'elles soient bien définies, ces solutions se comportent du point de vue statistique comme un phénomène soumis au hasard*. On les distingue cependant des phénomènes aléatoires* généraux en les appelant pseudo-aléatoires*.

Le chaos déterministe est une manifestation d'instabilité* des systèmes dynamiques.

On a mis en évidence le chaos déterministe dans des systèmes dynamiques variés allant du billard plan à la turbulence dans les fluides et les plasmas, de systèmes chimiques et biochimiques en réaction au comportement d'organes biologiques comme les membranes ou le cœur. L'établissement de l'existence du chaos déterministe a été longue et tortueuse (Cf. Dynamique non linéaire et chaos* (histoire))

Le chaos déterministe a été mis en général en évidence dans des systèmes à faible nombre de degrés de liberté. La mise en évidence du chaos déterministe pour des systèmes classiques à grand nombre de particules (gaz) en interaction constituerait un pas décisif dans l'élaboration des fondements de la mécanique statistique* classique. Ce but, poursuivi par la théorie ergodique* est techniquement difficile à atteindre, ce qui fait même parfois douter de son bien fondé.

En définitive, le chaos déterministe montre que contrairement à ce qui était généralement admis les systèmes déterministes à petit nombre de degrés de liberté peuvent avoir un comportement aléatoire. Ce comportement advient en l'absence de tout bruit* et de toute perturbation stochastique extérieure, dont il se distingue clairement. Des mécanismes généraux de transition vers le chaos* par bifurcations* successives peuvent être mis en évidence. Les calculs par

ordinateur révèlent des figures complexes et harmonieuses où viennent souvent se mêler des structures fractales*.

CHAOS SPATIAL

Il n'y a pas de différence de principe entre le chaos spatial (chaos dans les systèmes distribués*) et le chaos temporel dans les systèmes dynamiques. La seule véritable différence est dans le nombre de variables dont dépend le problème, et l'on comprend que l'étude des processus stochastiques* ait précédé l'étude des champs aléatoires* tout comme l'étude des systèmes dynamiques chaotiques s'est développée avant l'étude des milieux désordonnés.

Les études sur les phénomènes spatiaux se sont développées indépendamment de l'étude des phénomènes dynamiques. La jonction ne s'est faite qu'assez récemment, en particulier grâce à l'utilisation de langages communs pour les phénomènes critiques* et les phénomènes chaotiques. C'est l'apparition de paradigmes universels comme ceux d'échelle*, de renormalisation* d'autosimilarité* qui donne son unité au problème du chaos temporel ou spatial. La théorie des fractals* et sa popularisation par Mandelbrot contribue à cette convergence.

On retrouve dans le domaine spatial les mêmes trois cas fondamentaux que dans le domaine temporel :

Périodicité	cristaux	
Quasi-périodicité	quasi-cristaux	
Chaos	milieux	amorphes,

turbulence.

CHAOS (Transition vers le)

CHARGE ELECTRIQUE

CHARME

Nombre quantique caractéristique des hadrons* ou des quarks*.

CHAT DE SCHRODINGER

Expérience de pensée imaginée par Schrödinger pour mettre en évidence les difficultés de l'interprétation de Copenhague* de la mécanique quantique.

Un chat est enfermé dans une boîte avec un dispositif au cyanure actionné par un phénomène aléatoire tel un atome radioactif. Au bout d'un certain temps le chat est réellement mort ou vivant. Dans l'incertitude où l'on se trouve avant d'ouvrir la boîte, la M.Q. décrit

l'état du chat comme une superposition* d'état mort et d'état vivant. Superposition qui conduirait à une interférence si le chat était un objet quantique*. En fait le chat comme objet classique a une probabilité d'être mort ou vivant selon la probabilité d'action de la capsule au cyanure. En tant qu'objet quantique il « est » dans un état de superposition, ce qui manifeste seulement l'état des informations disponibles pour l'observateur*. Lorsque l'on ouvre la boîte (mesure*) cette superposition se réduit à l'état mort ou à l'état vivant. C'est cette réduction* instantanée de l'état qui constitue le problème de la mesure en M.Q., soulignant bien que l'état en mécanique quantique est un état de connaissance de l'observateur. Seule l'interprétation réaliste de l'état offre une situation paradoxale.

Nous sommes confrontés ici à une réalité construite par l'observateur. En classique l'incertitude de l'observateur se traduit par un « ou », soit mort soit vivant, en quantique par un « et », mort sinon vivant.

Le paradoxe naît de ce que l'on représente ce et par une somme de fonctions d'ondes, et que l'on voit mal comment cette somme se réduit à un seul terme lors de la mesure, comment on passe du et au ou.

CHIMIE

Science des atomes*, des molécules* et de leurs interactions spécifiques à travers les transformations que constituent les réactions chimiques. Reine des sciences au XIX^e siècle de par ses hypothèses hardies sur l'existence des atomes et la structure atomique des molécules, rendant compte de leur réactivité, elle a été détrônée par la physique* qui s'est emparée de son atomisme*. Dès le XIX^e siècle elle a établi deux de ses piliers inébranlables, la formule chimique* développée, introduisant la notion de liaison chimique*, et le tableau de la classification périodique des éléments* de Mendéléev*. Ce sont là les principes essentiels de tout discours et de toute pratique de la chimie.

D'une pratique scientifique, la chimie est rapidement passée au stade industriel, avec comme premiers succès notoires la production de colorants artificiels (aniline) et la production de médicaments (acide acétylsalicylique-aspirine). Entre les deux guerres mondiales se produisit la révolution des polymères* ouvrant l'ère des matières plastiques. Aujourd'hui, avec le pétrole comme matière première, de nombreuses industries chimiques ont conquis de vastes domaines. Industrie alimentaire, industrie pharmaceutique, industrie cosmétique, industrie des matériaux synthétiques.

Les chimistes classent les atomes et les molécules selon certaines catégories correspondant à des fonctions chimiques. Les atomes se trouvant dans une même colonne du tableau de Mendelév ont des propriétés similaires (les gaz rares peu réactifs comme le néon ou le krypton, les alcalins très réactifs comme le sodium ou le potassium...les métaux comme le fer, le cuivre, ou le silicium). Les molécules sont d'abord classées selon les catégories d'acide ou de base. Un acide réagit sur une base en formant un sel minéral (chlorure de sodium, sulfate de potassium..) après avoir éliminé de l'eau. On distingue ensuite les oxydants des réducteurs. Les oxydes métalliques forment une classe de composés fort présents dans la nature. C'est la chimie minérale.

Le carbone, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène forment des millions de molécules différentes qui sont regroupées dans la chimie organique, selon des fonctions chimiques distinctes (hydrocarbures saturés ou aromatiques que l'on trouve dans le pétrole, acides, amines, aldéhydes, cétones...). La plupart des acteurs de la biochimie* appartiennent à la chimie organique. L'énorme développement de la chimie organique a été grandement favorisé par l'utilisation des formules chimiques indiquant les centres réactifs et les groupements fonctionnels caractéristiques.

La clé de voûte de toute la théorie chimique est la notion de valence, nombre d'atomes auxquels un atome donné peut s'accrocher, et la notion de liaison chimique*, lien exclusif entre atomes, donnent à la formule chimique l'aspect d'un graphe* moléculaire.

Au XX^e siècle la mécanique quantique*, appliquée à la chimie (Chimie quantique*) va confirmer une grande partie des conceptions chimiques fondamentales, en apportant un élément nouveau essentiel : la liaison chimique est constituée par deux électrons* de spin opposés. Le principe de Pauli* stipulant que seuls deux électrons peuvent se trouver dans le même état quantique*, ouvre la voie à la compréhension de la classification périodique des éléments et de la structure des molécules.

Mais la chimie par delà les beautés de l'architecture moléculaire est la science des réactions chimiques. Jusqu'à présent le chimiste se trouve dans une situation où il manipule simultanément des milliards de molécules. C'est le règne du hasard des collisions et des faibles rendements réactionnels par suite de la réversibilité des réactions. L'évolution d'une réaction chimique dépend de l'action facilitante de catalyseurs*. La vie est impensable sans les catalyseurs biochimiques que sont les enzymes*

Le rêve de tout chimiste serait de manipuler les molécules pièce par pièce. Cette terre promise entrevue dans les écrits des pionniers de la nanotechnologie* n'en est qu'à ses balbutiements*. Mais la molécule unique ou le moteur moléculaire* sont déjà là. Le laser* renouvelle la photochimie*. De nouveaux composés étonnants du carbone ont été découverts, comme le fullerène ou le graphène (Cf. Nanoscience*). La chimie a encore devant-elle d'immenses perspectives, laissant entrevoir l'exercice d'un grand art. Le rêve des alchimistes* est-il en train de se réaliser ?

On peut dire que sur cette voie, la chimie du XX^e siècle a triomphé dans le domaine des polymères, si l'on n'oublie pas que la biochimie* elle-même est principalement une science des biopolymères biologiques que sont les protéines* et l'ADN*.

CHIMIE QUANTIQUE

Tentative d'expliquer les faits de la chimie* à l'aide de la mécanique quantique* appliquée à la structure des atomes et des molécules et de leurs interactions.

La tâche consiste à résoudre l'équation de Schrödinger* de l'ensemble des noyaux et des électrons. Tâche impossible si l'on tient compte du fait que pour un tel système cette équation n'est pas formulée dans l'espace tridimensionnel mais dans l'espace de configuration* à $3N$ dimensions. La solution exacte d'équations aux dérivées partielles de cette dimension est hors de portée des méthodes analytiques des mathématiques. Il faudra donc avoir recours à des méthodes approchées traditionnelles, soit la méthode des variations* ou la méthode des perturbations*. Ce qui suppose toujours l'utilisation d'un modèle* pour la solution approchée.

Ce modèle suppose en général les noyaux fixes et source d'un potentiel électrostatique d'attraction pour les électrons. Ce modèle s'inspire alors en général de la solution exacte pour l'atome d'hydrogène ou quasi exacte pour l'atome d'hélium, tout en tenant compte comme pour la molécule d'hydrogène du principe de superposition* des fonctions d'onde et de l'antisymétrisation des fonctions d'ondes liée à l'indiscernabilité* des électrons. Antisymétrisation qui introduit un état enchevêtré* responsable de l'énergie d'échange* qui stabilise la structure moléculaire.

La solution exacte de l'atome d'hydrogène introduit des nombres quantiques* et des fonctions d'onde monoélectroniques (orbitales). L'emploi de ces orbitales pour la constitution d'un modèle général de la structure électronique d'un atome, permet de retrouver

la notion de valence* et de liaison chimique par paires d'électrons de spin* opposés, et de reconstituer la classification périodique des éléments* de Mendeleev*. Remarquable succès qualitatif d'un modèle qui illumine l'ensemble de la chimie.

Pour les molécules, comme pour les atomes, on définit un modèle hydrogénoïde construit à l'aide de fonctions d'onde monoélectroniques (orbitales). Pour les molécules, les orbitales moléculaires sont en général représentées comme une combinaison linéaire d'orbitales atomiques (LCAO). La méthode d'approximation fournit alors la meilleure combinaison linéaire pour chaque orbitale moléculaire, qui se trouve ainsi délocalisée sur toute la molécule. Les orbitales moléculaires sont rangées par ordre d'énergie croissante et les plus basses contiennent chacune deux électrons de spin opposés (Principe de Pauli*). Elles sont dites orbitales occupées et les orbitales en excès sont appelées orbitales excitées.

Ce modèle d'orbitales délocalisées sur tous les atomes rend bien compte de certaines propriétés globales comme les propriétés spectroscopiques*. Une raie spectrale correspond à l'énergie absorbée lors du passage d'un électron d'une orbitale occupée à une orbitale excitée. De nombreuses caractéristiques spectroscopiques moléculaires dans le spectre visible ou ultra-violet ont été ainsi expliquées. On peut dans ce modèle calculer les probabilités de présence des électrons le long du squelette moléculaire. On obtient ainsi les zones où les électrons s'accumulent ce qui permet de nombreuses corrélations avec les faits chimiques. La zone entre deux noyaux est une telle zone d'accumulation ce qui établit une certaine corrélation avec la notion de liaison chimique*.

Tous ces calculs ont été rendus routiniers par l'arrivée des ordinateurs. Ils ont été multipliés avec une sophistication variable pour de très nombreuses molécules minérales et organiques. On a obtenu ainsi de très nombreuses interprétations de la structure moléculaire, de l'effet des forces intermoléculaires* et des faits de la réactivité chimique. Plus la précision recherchée est exigeante et plus la molécule est grande, plus le calcul est coûteux, même à l'aide de superordinateurs. On comprend donc que ces calculs soient menés à l'aide de nombreuses approximations sur le nombre d'électrons en jeu et sur l'évaluation des nombreuses intégrales qui interviennent. Une approximation courante limite les calculs aux électrons périphériques ou électrons de valence* (électrons π des molécules organiques conjuguées). C'est le cas de la célèbre méthode de Hückel des débuts de la chimie quantique.

Dans le cas général ces méthodes qui travaillent dans l'espace à $3N$ dimensions se heurtent très rapidement à un mur s'il s'agit d'un système à quelques dizaines d'électrons. On peut alors remarquer qu'une observable essentielle comme l'énergie ne dépend que de la densité de présence de 1 électron et de la densité de présence de 2 électrons. On peut à la rigueur approximer la seconde en fonction de la première pour réduire le problème à l'espace tridimensionnel ordinaire. On a en fait proposé un théorème selon lequel l'énergie était une fonctionnelle* de la densité monoélectronique, et que la densité exacte correspondait au minimum de cette fonctionnelle. De là une nouvelle méthode de calcul de la chimie quantique, la théorie de la fonctionnelle densité, aux développements fertiles et prometteurs.

Parmi les nombreux problèmes que la chimie pose à la chimie quantique mentionnons celui de la structure moléculaire. On demande en effet à la chimie quantique de préciser les structures spatiales des molécules en particulier pour les molécules isomères*. Un problème qui s'est posé a été celui de la molécule d'ammoniac NH_3 , où la théorie quantique prévoit une probabilité de présence de l'atome d'azote égale de part et d'autre du plan des hydrogènes alors que les faits physico-chimiques plaident en faveur d'une structure pyramidale. C'est le problème de la molécule unique et de ses interactions avec les autres molécules. C'est cette interaction qui détruit la cohérence quantique de la molécule d'ammoniac et rompt la symétrie. Les propriétés de l'eau ne sont pas les propriétés de la simple molécule d'eau OH_2 à cause des liaisons hydrogènes* entre molécules d'eau.

L'étude des réactions chimiques reste difficile car elle mobilise de nombreux électrons et doit parallèlement tenir compte du mouvement des noyaux. Elle représente donc des calculs très lourds d'autant plus qu'il faut tenir compte des molécules de solvant et du rôle du catalyseur éventuel. Ce problème relève moins de la chimie quantique que de la dynamique moléculaire*, où interviennent des données empiriques.

La chimie quantique a contribué à conforter et justifier de nombreux faits de la chimie* tout en modérant les représentations moléculaires trop imagées des chimistes. Elle a confirmé en gros le rôle de deux électrons dans la formation de la liaison chimique, en introduisant la notion d'énergie d'échange*. Elle n'a pas fourni une image de la dynamique des électrons dans la molécule, mais offert des moyens spécifiques pour rendre compte du comportement moléculaire global. Elle a notamment éliminé la réalité physique des molécules correspondant aux différentes formules du benzène*, dont on a pu proclamer la coexistence, alors qu'il s'agit au mieux d'une

superposition d'états* (méthode de la mésomérie*). Problème qui a suscité une furieuse polémique aux débuts de la chimie quantique.

Le chimiste s'accommode tant bien que mal de l'image globale conforme aux principes de la mécanique quantique que lui offre la chimie quantique. Il s'accorde à voir dans les zones où s'accumulent les électrons des régions de grande réactivité chimique. Il consent à consulter la chimie quantique sur des problèmes de stabilité moléculaire. Conformément à la fragilité des phénomènes quantiques vis-à-vis de la décohérence*, la chimie n'offre pas de nouveaux effets quantiques hormis l'énergie d'échange* et l'illustration du rôle du spin*, dont elle souligne l'intervention essentielle dans la stabilité de la matière*.

Le succès historique de la chimie quantique est d'avoir mis des nombres sur les formules chimiques et d'avoir fourni des images de la « structure » électronique tout en rendant compte des propriétés spectroscopiques des molécules. Mais les images de la chimie quantique, liées à la notion d'orbitale, propagent chez les chimistes une interprétation erronée de la mécanique quantique, en laissant croire que les électrons « sont » dans les orbitales, et que celles-ci représentent des électrons alors qu'elles ne représentent au mieux que nos connaissances sur des mesures effectuées sur le système. En voulant mettre des images physiques sur des éléments mathématiques de calcul de la réalité, la chimie quantique cède à l'usage courant en mécanique quantique de vouloir transformer une réalité mathématique en une réalité physique. L'usage des diagrammes de Feynman* en est un autre exemple flagrant.

La chimie quantique porte un nom usurpé, car pour les chimistes, c'est de la physique quantique moléculaire. Elle interprète bien la structure moléculaire et les propriétés spectroscopiques des molécules. Elle confirme et enrichit la nature de la liaison chimique. Mais les chimistes la regardent d'un mauvais œil car elle leur a volé leur atome, et se hisse rarement, et avec difficulté, à leur niveau macroscopique. En particulier dans l'explication de la réaction chimique. Car on bute là sur un des problèmes mal résolus de la transition du quantique au classique. Une guerre intestinale pour la représentation de la nature entre chimistes et physiciens.

CHIRALITE

CHOSE

Dans le sens le plus général désigne tout ce qui existe réellement. Un élément du "Comme ça".

Mais dans un sens plus restreint on distingue souvent les choses (objets) et les propriétés (actions).

CHROMATOGRAPHIE

CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE

La chromodynamique quantique est la théorie quantique du champ des forces d'interaction nucléaire forte* entre quarks*. C'est une théorie de champ de jauge*. Les quanta de ce champ sont les gluons* tout comme les photons* sont les quanta du champ électromagnétique.

La chromodynamique quantique est construite à l'image de l'électrodynamique quantique en se fondant sur l'invariance de jauge*.

CHROMOSOMES

Les chromosomes sont des structures spécifiques visibles au microscope lors de la division cellulaire. Ils ont la forme d'un grand X. Ils sont constitués de nucléosomes* (ADN et histones) et sont les porteurs de l'information génétique. Celle-ci est déterminée par les molécules d'ADN porteuses des gènes*. Chez l'homme il y'a 23 chromosomes différents chacun porteur d'un nombre spécifié de gènes.

CINETIQUE

CINETIQUE CHIMIQUE

CINETIQUE (THEORIE- Théorie cinétique des gaz).

CIRCUIT INTEGRE

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

CLASSIQUE ET QUANTIQUE

La physique classique* et la physique quantique* présentent deux images du monde* difficilement compatibles à première vue. Dans la première on raisonne avec des particules ponctuelles localisées et des trajectoires dans l'espace de phase* alors que dans la seconde on ne peut raisonner qu'à travers les états*. Toutes les images de la

physique classique n'ont pas d'équivalent en physique quantique qui décrit la nature à travers une boîte noire* où seules apparaissent des conceptions abstraites. La physique quantique s'appuie cependant sur l'existence de la physique classique, dans sa formulation traditionnelle de la quantification* et dans le caractère classique des observables résultant des mesures. Cette correspondance entre classique et quantique se traduit par une analogie formelle entre l'expression des deux théories. Mais alors qu'en physique classique les observables sont des attributs* des objets, elles ne sont plus en physique quantique que des réponses à un appareil de mesure. C'est ainsi par exemple ce qui fait la différence de statut entre les fluctuations du champ résiduel* en électromagnétisme et les fluctuations du champ quantique du vide. Une théorie comme l'Electrodynamique stochastique* a cherché néanmoins sans succès à gommer cette différence de statut, en voyant dans le champ résiduel* l'origine du champ du vide quantique*. Cette opposition entre classique et quantique est l'épine dorsale de toutes les discussions sur le réalisme* en physique, le classique étant jugé réaliste et le quantique ne relevant que d'un réalisme structural*.

Le passage du classique au quantique (quantification*) et le passage inverse du quantique au classique (limite classique de la mécanique quantique*, décohérence*) sont des instants charnières critiques pour la constitution de l'édifice de la physique théorique contemporaine.

Il existe en physique quantique un type de démarche qui allie classique et quantique, lorsque l'on étudie la perturbation d'un objet quantique par un champ classique, l'action sur un atome ou une molécule du champ électromagnétique classique par exemple. C'est l'approximation semi-classique*.

La frontière entre le classique et le quantique reste souvent mal définie comme le montre l'existence de phénomènes quantiques macroscopiques* ou la pratique des nanosciences*.

CLONAGE

A strictement parler le clonage est la création d'une copie d'une séquence de l'ADN ou du génome tout entier d'un organisme. Dans ce dernier cas le clonage intervient naturellement dans la naissance de jumeaux identiques. Dans le débat sur le clonage ce dont il s'agit est du transfert nucléaire de cellules somatiques. C'est le transfert du noyau d'une cellule somatique dans un ovocyte énucléé. L'ovocyte ainsi produit est traité chimiquement ou électriquement pour stimuler la

division cellulaire et former un embryon. Puisque l'ADN nucléaire de l'embryon est celui de la cellule somatique, il est identique génétiquement à celui de l'organisme dont la cellule somatique a été extraite.

CODE

CODE GENETIQUE

Ensemble des codons*. Correspondance entre des triplets de nucléotides* dans l'ADN* ou l'ARN* et des acides aminés* dans les protéines*. Il existe 64 triplets de nucléotides qui codent pour 20 acides aminés, le code est donc dégénéré. A un acide aminé correspondent plusieurs codons. Certains codons codent l'arrêt de la synthèse de la protéine

	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	Arrêt	Arrêt	A
	Leu	Ser	Arrêt	Trp	G
	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
C	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
	Ile	Thr	Asn	Ser	U
A	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G

G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	C

Ce code est universel pour toute la biosphère. Ainsi l'évolution concerne non seulement les espèces mais le phénomène de la vie lui-même.

La correspondance entre ADN et polypeptide n'est pas aussi directe que l'existence du code génétique pourrait le laisser penser. En fait sur une séquence d'ADN, il y a une mosaïque de régions transcrites et non transcrites. Les régions transcrites sont dénommées exons et sont interrompues par des régions non transcrites dénommées introns. Toute la séquence de l'ADN est transcrite dans l'ARN*, mais avant que cet ARN n'atteigne les ribosomes* il s'associe à des protéines pour exciser les introns et mettre bout à bout les exons, produisant un mRNA qui est traduit en un polypeptide. Mais l'histoire est encore bien plus compliquée.

CODON

Triplet de nucléotides* représentant un acide aminé* d'une protéine*. C'est l'élément de base du code génétique*.

COGNITIVES (SCIENCES)

Ensemble des sciences qui contribuent à éclaircir les mécanismes de la connaissance* et de la pensée*. Les sciences de l'esprit*. Biologie*, neurosciences*, psychologie*, linguistique*, logique*, modèles mathématiques, intelligence artificielle*, anthropologie* et philosophie*, participent à cet effort interdisciplinaire.

Il existe différentes écoles de pensée.

L'une d'elle, le computationnisme est une variété de fonctionnalisme* car elle ne s'intéresse pas à la constitution réelle du cerveau, mais à la manière dont il fonctionne. Elle prend naissance

dans les années 1950. C'est un avatar du béhaviorisme* qui envisage le cerveau comme un ordinateur, et ne s'intéresse qu'au niveau du software*, c.a.d. aux règles de manipulations des symboles. Les fonctions mentales sont décrites comme des processus de traitement de l'information*. La cognition consiste en états mentaux* internes discrets, représentations* ou symboles*, manipulés selon des règles ou des algorithmes. Cette démarche est aussi désignée sous le nom de symbolisme*. Ce paradigme s'inscrit parfaitement dans la tradition dualiste occidentale de la séparation entre l'esprit* (res cogitans cartésienne) - ici la représentation mentale du monde extérieur- et le monde matériel dont le corps fait partie (res extensa). L'essor de l'intelligence artificielle* des années 1950-1980 est une des conséquences de cette façon de voir. C'est l'aboutissement naturel d'un siècle de logique* et de positivisme logique*, consacré aux développements internes des conceptions et ignorant délibérément le contexte*.

A partir de 1980 se développe le connexionnisme qui représente les fonctions mentales comme le résultat de l'activité de réseaux interconnectés d'éléments simples. L'exemple typique est constitué par les réseaux neuronaux*, modèles des réseaux de neurones interconnectés par les axones et les synapses. L'activité mentale est une activité émergente* dans un système cognitif qui n'est pas un calculateur mais plutôt un système avec auto organisation*, produisant des structures nouvelles au contact de l'environnement. Le connexionnisme se tourne vers une représentation distribuée* plutôt qu'une représentation symbolique*. De nombreuses critiques ont été émises, en particulier soulignant l'absence de réalisme neurologique dans les réseaux connexionnistes. Ces réseaux sont trop peu récurifs*, ont des inhibitions trop fortes, leurs algorithmes d'apprentissage ne sont pas réalistes, leurs fonctions de transfert trop simplistes, et on ne voit pas les correspondances possibles avec le grand nombre de neurotransmetteurs et d'hormones qui interviennent dans la physiologie cognitive.

Une réflexion sur l'autonomie* des systèmes vivants a mené à la définition de l'autopoïèse* dans les années 80. Maturana et Varela étendent considérablement le concept de cognition puisqu'ils identifient le processus de connaître au processus même de la vie. La cognition, comme la vie, consiste en l'auto génération et l'autoperpétuation de la vie. Les interactions d'un organisme avec son environnement sont toutes vues comme des interactions cognitives. La cognition n'est plus limitée au cerveau et à la raison mais recouvre l'ensemble des processus de la vie: perceptions, instincts, émotions,

affects, comportements et implique tout le corps. Tous ces processus participent à l'autoproduction – l'autopoièse – du système. Les structures concrètes, somatiques aussi bien que mentales, se modifient en permanence tout en maintenant le pattern général d'autoproduction. La cognition n'est pas une représentation* mais une production autonome de concepts qui vont jouer le rôle de symboles. ce qui est au fond la reprise de l'idée de Helmholtz* qui imprègne une grande partie de la physique du XX^e Siècle (CF. Symbolisme en physique*).

Plus récemment on a pu défendre une conception de la cognition comme système dynamique*. Les tenants de cette conception pensent que des systèmes d'équations différentielles peuvent modéliser le comportement humain. Ces équations représentent l'évolution des états mentaux* dans un espace de phase* de dimension élevée, espace des pensées et des comportements. On adopte alors la terminologie de la théorie des systèmes dynamiques pour parler de la cognition en termes de trajectoires*, d'attracteurs* ou de chaos déterministe*. La rétroaction* et l'auto-organisation sont à l'honneur dans des conceptions qui n'ont que le mot émergence* à la bouche. On voit considérer les représentations comme des attracteurs* et la succession d'attracteurs constitue la dynamique du développement cognitif. Les relations entre le dynamicisme et le connexionnisme sont ambiguës, car il n'est pas clair en quoi celui là doit remplacer celui-ci, le connexionnisme étant un dynamicisme particulier, à moins que celui-ci ne soit qu'une classe particulière de modèles connexionnistes. En fait la théorie des systèmes dynamiques exerce aujourd'hui une influence considérable sur les sciences cognitives, en particulier dans le domaine des neurosciences théoriques*.

L'approche dynamique revendique un lien essentiel avec l'idée que les propriétés cognitives émergent à partir de propriétés naturelles, ce qui est une affirmation de naturalisme* cognitif. Elle repose par ailleurs le problème du représentationnalisme*.

Le développement des sciences cognitives fait appel à toutes les ressources intellectuelles des époques où il prend place. C'est ainsi que l'on voit se manifester massivement la cybernétique* et la théorie des automates*, la théorie des systèmes dynamiques* et la modélisation mathématique en intelligence artificielle* rendue possible par l'emploi de l'ordinateur.

Les progrès des neurosciences* pèsent lourd sur les sciences cognitives, en particulier les progrès de l'imagerie par RMN* cérébrale et de la tomographie par émission de positrons*. On assiste au développement des neurosciences cognitives*, où l'on parle des

corrélats neurologiques de l'esprit et de la conscience*. Mais il ne faut pas oublier que l'imagerie travaille au niveau du millimètre alors que les neurones et les synapses sont bien au-delà. Il y a là un travail énorme, comparable à celui des spectroscopistes du XIX^{ème} siècle, où l'on met en place une cartographie cérébrale. Mais la spectroscopie*, fort utile par ailleurs, n'a pris un sens que par une théorie, la théorie quantique. Les localisations cérébrales par imagerie RMN ne prendront un sens que par une théorie de l'activité cérébrale.

L'une des conséquences de ces interactions pluridisciplinaires au sein de ce qu'on appelle la cognition est de changer de façon importante la façon dont s'organisent les thématiques de recherche en sciences cognitives. Celles-ci ne se structurent donc non plus seulement par rapport aux différents objets d'étude traditionnels des disciplines constitutives de ce domaine de recherche (les neurones et le cerveau pour les neurosciences*, les processus mentaux pour la psychologie*, le comportement animal pour l'éthologie*, l'algorithmique et la modélisation pour l'informatique, etc.) mais aussi souvent autour des fonctions cognitives que l'on cherche à isoler les unes des autres. Des chercheurs de plusieurs disciplines s'intéresseront collectivement, par exemple, à la mémoire ou au langage. Cette mutation se manifeste dans l'émergence du vocable : *science de la cognition* qui traduit, ou revendique, le fait que ce domaine pluridisciplinaire est en passe de se constituer comme une science, unifiée et à part entière.

COHERENCE (OPTIQUE)

COHERENCE (QUANTIQUE)

La cohérence quantique désigne les conditions qui permettent la description d'un système microphysique par le jeu quantique de la superposition des états*, au cœur de toute description quantique. Cette cohérence peut être rompue, décohérence, par l'intervention d'un phénomène perturbateur comme une mesure* ou l'effet de l'environnement.

C'est ainsi que dans les expériences mettant en jeu des interférences des états*, la figure d'interférence disparaît si l'on introduit un appareil de mesure qui cherche à préciser les trajectoires.

COLLOQUE DE CORDOUE

Colloque organisé à Cordoue en 1979 par la chaîne de radio France Culture sur le thème « Science et conscience ». Son organisateur, Michel Cazenave, éditeur de l'œuvre du psychanalyste

Jung*, tout en arguant de ses bonnes intentions scientifiques, s'est laissé entraîner par ses intervenants sur le terrain de la parapsychologie*. Le sujet en discussion était le paradoxe EPR*, l'expérience d'Aspect* et les corrélations quantiques*. Les physiciens rationalistes protestèrent avec énergie contre cette déviance quasi mystique, qui avait les faveurs d'un public flatté par les démarches ésotériques. L'absence d'explications* ordinaires pour la nature extraordinaire des corrélations quantiques permet en effet toutes sortes de divagations. Olivier Costa de Beauregard qui ne se cache pas de croire à la télépathie se défend d'être isolé : « *Plusieurs grands noms de la physique pensent dans ce sens: un Josephson, un Wigner, un Sudarshan, et d'autres encore... Aux Indes, 90 % des physiciens sont spiritualistes. Ils croient à « mind over matter » ce qui ne les empêche pas d'être de très bons physiciens.* »

Evènement s'il en faut prouvant qu'il n'y a pas divorce réel entre la science* et le mythe* (Cf. Science et mythe*).

COMME SI (Cf. Fictionnalisme*)

COMME SI. COMME ÇA.

Slogan utilisé pour résumer la problématique essentielle de la Théorie de la Connaissance (Epistémologie*) centrée autour du débat entre le réalisme scientifique* et l'antiréalisme*.

Mais toute opposition dramatise une problématique sans pour autant prétendre réaliser une dichotomie.

"Comme si. Comme ça" veut polariser l'opposition entre connaissance et réalité, conceptuel et réel, pensée et chose, discours et monde, empirisme* et réalisme*.

Le "Comme ça" c'est le "monde-là". Dasein dans l'allemand de Heidegger*.

A partir de Platon et jusqu'à l'époque actuelle, on voit supposer un "monde là", initialement op-posé au langage ou à la pensée. Cela engage l'humanité gréco-occidentale dans un processus de conciliation progressive avec ce monde extérieur, dans des démarches d'adéquation du sujet à l'objet, de réduction d'un écart supposé avec le monde, de rattrapage du vrai.

Le "Comme ça" c'est le monde des choses* en dehors de nous, existant en notre absence. Les "choses en soi" comme les nomme Kant* en les jugeant inconnaissables. Le "Comme ça" c'est le Réel*, connaissable ou pas.

Le "Comme ça" c'est l'essence des choses, c'est la cause profonde des apparences fournies par notre perception: le "Comme

ca" (Notez la perte de l'accent grave sur le a). Mais le "Comme ca" ne prend un sens qu'à travers le "Comme si", les productions du discours et de la pensée. Toute observation ne prend un sens qu'à travers une conceptualisation. Tout se passe comme si les objets du discours étaient véritablement réels, sans qu'il soit toujours possible de s'en assurer, tout au moins par l'observation.

On est en présence de trois instances de la connaissance du monde: le monde sensible - comme ca-, le monde conceptuel ou monde du discours de la science -comme si-, et le monde réel -comme ça.

Le Positivisme* n'admet que le monde sensible et le monde conceptuel. Son discours sur le monde se borne au "Comme si". Le Pragmatisme* valorise le "Comme si". Le comme si c'est le règne du fictionalisme* et de l'imagination*.

Le Réalisme* admet les trois instances et imagine une dynamique qui va du monde réel à ses apparences sensibles organisées par le discours conceptuel, mais où la connaissance du monde réel referme la boucle par un mouvement transcendantal à partir du discours. Le "Comme si" est la seule voie d'accès au "Comme ça".

Plutôt que de reconnaître des catégories bien délimitées, nous avons aperçu un mouvement dialectique constant qui sépare pour mieux confondre. Ce mouvement est au cœur de l'histoire culturelle.

Ainsi A. Koyré* le repère comme le plus important moment de la révolution épistémologique et scientifique de la Renaissance et des Temps Modernes.

"Le changement capital introduit par Galilée avec d'autres mathématiciens platonisants, comme Kepler, dans l'ontologie scientifique, fut d'identifier la substance du monde réel aux entités mathématiques contenues dans les théories utilisées pour décrire les apparences.

Études d'histoire de la pensée scientifique. Les origines de la science moderne.

A vrai dire, c'est peut-être plutôt Descartes qui "laisserait tomber" la substance aristotélicienne (ousia et hylé), privilégiant la "res cogitans". Sa matière est effectivement purement conceptuelle, même dans sa physique. Mais Descartes reste un réaliste, car le privilège du "Comme si" ne l'empêche pas d'admettre l'existence du "Comme ça".

« Qu'à proprement parler, nous ne concevons les corps que par la faculté d'entendre qui est en nous..... et que nous ne les concevons pas de ce que nous les voyons ou que nous les touchons, mais seulement de ce que nous les concevons par la pensée.

Or Dieu n'étant point trompeur, il faut confesser qu'il y a des choses corporelles qui existent. Toutefois elles ne sont peut être pas entièrement telles que nous les apercevons par les sens. »

Méditations Métaphysiques.

Dieu est le meilleur garant du "Comme ça", car chez Descartes comme chez Einstein plus tard, Dieu, n'est ni trompeur, ni vicieux.

COMMUNICATION

Acte de transmettre un message* (référent* codé*) par un canal* entre un émetteur et un destinataire (observateur).

COMMUTATION (Relations de)

COMPARAISON

COMPLEMENTARITE

La physique classique décrit les objets par leurs attributs* et l'on peut toujours imaginer un dispositif expérimental où tous ces attributs soient déterminés simultanément. La mécanique quantique* repose sur la définition de la notion d'observable*, quantité macroscopique correspondant à une mesure*. Il est alors naturel que certaines observables ne puissent être déterminées simultanément dans un seul contexte expérimental macroscopique. Sinon elles seraient des attributs. Cette idée qui constitue l'âme de la mécanique quantique a été érigée en doctrine par Bohr en 1927, sous le nom de complémentarité (Cf. Principe de complémentarité*). On parle ainsi d'observables complémentaires ou non compatibles*. Le dualisme onde-corpuscule* en est un parfait exemple puisqu'il proclame que

l'on ne peut observer macroscopiquement et simultanément le corpuscule et l'onde de de Broglie (les interférences*)

COMPLEXITE

La complexité est à la mode, comme en son temps la cybernétique*. L'étude des « systèmes complexes* » fait l'objet de programmes nationaux et européens, et entre dans la désignation de nombreuses institutions. L'emploi du terme « complexité » pour qualifier un objet, un système ou un processus, est relativement récent. Il provient de considérations sur le « coût » algorithmique ou temporel des calculs informatiques et de réflexions sur la nature de l'aléatoire* et du pseudo-aléatoire* en théorie des systèmes dynamiques non linéaires. L'expression précise de la notion intuitive de complexité passe toujours par l'emploi d'un modèle* du phénomène étudié. La diversité des modèles, liée aux multiples objectifs d'une modélisation, entraîne une floraison de définitions et de mesures de la complexité dont la luxuriance peut faire penser à un zoo peuplé de sigles et d'appellations.

La complexité des images visuelles est une question essentielle qui mérite l'attention des psychologues cognitifs, des spécialistes de la vision artificielle, des artistes et des critiques d'art. Elle conjugue des connaissances sur les mécanismes de la perception visuelle et sur la structure des systèmes formels.

Comme pour toute considération sur les formes, il faut soigneusement distinguer les aspects objectifs et les aspects perceptifs. La perception de la complexité est une problématique à part entière, soulignant le caractère subjectif de l'évaluation de la complexité, en tant que relation entre un phénomène et un observateur ayant ses motivations propres. La complexité se trouve plus dans la manière dont le phénomène est observé, c.a.d. dans le choix d'un modèle*, que dans le phénomène lui même. Si l'observateur se satisfait d'un modèle simple suffisamment représentatif, il n'y a pas de complexité présente.

Les différentes conceptions de la complexité et les mesures associées répondent à trois problématiques distinctes :

La difficulté de décrire (*Information algorithmique, entropie*, longueur de description minimum, information de Fisher, complexité de Lempel-Ziv..*)

La difficulté d'engendrer (*Complexité calculatoire, profondeur logique, profondeur thermodynamique.....*)

Le degré d'organisation, comme difficulté de décrire l'organisation ou bien comme information mutuelle des parties.

COMPLEXITE ALEATOIRE (ou Complexité algorithmique, ou complexité de Solomonoff-Chaitin-Kolmogorov)

Taille du plus petit algorithme (programme) capable de décrire complètement l'objet. Si cette taille n'est pas inférieure à la taille de l'objet, cela signifie qu'il n'y a pas d'autre description de l'objet que la donnée de l'objet lui-même. Cela correspond bien à l'intuition de ce qui est aléatoire*. Malheureusement la complexité algorithmique est incalculable, car rien ne permet d'affirmer qu'il n'existe pas un algorithme plus court que celui éventuellement trouvé.

La complexité d'une suite de nombres est très variable. Une suite de un billion de 1 est calculable par l'algorithme court : écrire un un billion de fois. Le premier million de décimales du nombre $\pi = 3,615\dots$ est calculable par un algorithme simple définissant le nombre π . La suite aléatoire de 0 et de 1 produite par le jet d'une pièce de monnaie (pile ou face) est à elle-même son plus court algorithme, parce qu'il n'y a pas dans cette suite de structure qui permette de la coder.

La complexité de Kolmogorov d'un objet peut donner une mesure de la quantité d'information qu'il contient. Ce n'est pas une mesure de la quantité de complexité physique, qui est donnée par la profondeur logique de Bennett ou complexité organisée*. Le lien entre complexité aléatoire et théorie de l'information de Shannon est assuré par le fait que la longueur probable de la plus courte description binaire sur ordinateur d'une variable aléatoire* est approximativement égale à son entropie* de Shannon. L'entropie de Shannon apparaît asymptotiquement comme une complexité de Kolmogorov moyenne. La complexité de Kolmogorov est cependant plus fondamentale que l'entropie de Shannon.

La théorie algorithmique de l'information opère avec la mesure absolue de l'information contenue dans un objet unique. Elle fonde la notion de hasard*. La théorie de Shannon utilise la notion de probabilité, et se trouve par là même liée à des répétitions d'évènements. Les deux théories opèrent sur le codage mais avec une définition différente de la longueur des codes. Dans les deux cas, comprendre c'est comprimer.

COMPLEXITE DE LEVIN

Le concept de complexité aléatoire* ou algorithmique mesure la quantité d'information contenue dans un objet comme la taille du programme le plus court qui produit l'objet, sans tenir compte des ressources que son exécution réclame. En particulier il ne tient pas compte du temps d'exécution, le nombre d'étapes du calcul en supposant que chaque étape requiert un temps fini. C'est de ce temps que tient compte la complexité organisée*. La complexité de Levin réalise un compromis des deux en pénalisant un programme lent, en multipliant le logarithme de son temps d'exécution par sa longueur. Ceci conduit à une quantité calculable en principe mais non calculable en pratique.

La complexité de Levin formalise la mesure esthétique de Birkhoff en esthétique mathématique*

COMPLEXITE D'UN SYSTEME BIOLOGIQUE

Un système biologique présente la plus grande complexité connue dans l'univers. Entendant par là que l'on y inclut le cerveau*, la pensée* et les systèmes sociaux.

Cette complexité se présente par niveaux* et la multiplication des niveaux participe à la complexité. Les particules subatomiques s'organisent en atomes*, qui s'organisent en molécules*, puis en macromolécules*, dont l'ADN* et les protéines*, qui s'organisent en cellules*. Les cellules s'organisent en tissus, qui forment des organes réunis dans des organismes. Les organismes forment des populations qui s'organisent en biosphères.

Il y'a là un enchevêtrement de niveaux avec apparition de propriétés émergentes. La vie dans son ensemble est une émergence*. Les propriétés vivantes émergent lorsque l'ADN et d'autres molécules s'organisent en cellules grâce à des flots d'énergie métabolique. Une bactérie unicellulaire est vivante, alors que les macomolécules qui la constituent ne le sont pas. La connaissance de ces macomolécules ne suffit pas pour prédire l'apparition de la vie à un niveau d'intégration supérieur. C'est le couplage des niveaux de réalité et l'intégration des activités métaboliques qui font d'un système biologique un système complexe*.

COMPLEXITE ORGANISEE (ou profondeur logique, ou complexité de Bennett)

Temps de calcul de l'algorithme le plus court décrivant l'objet ou temps de calcul du programme minimal engendrant l'objet. Un objet

profond, c .a. d. ayant une grande profondeur logique est un objet dont l'origine la plus probable est un long calcul. C'est un objet qui contient des redondances profondément cachées en lui que seul un long travail combinatoire peut faire apparaître, lui enlevant ainsi tout caractère aléatoire. Un objet profond porte réellement en lui la trace d'une longue évolution. Mais comme pour la complexité aléatoire* qui intervient dans sa définition, calculer avec certitude la profondeur.

COMPOSITION INTERNE (LOI DE)

Correspondance entre un couple d'éléments d'un ensemble et un autre élément de l'ensemble.

L'existence d'une loi de composition interne permet de définir sur un ensemble des structures algébriques* (groupe*, anneau, corps). L'existence de deux lois de composition interne définit sur l'ensemble une structure d'algèbre*. L'addition, la multiplication, les opérations élémentaires sur les ensembles (réunion, intersection) sont des lois de composition interne.

COMPRESSION DES DONNEES

COMPTON (EFFET)

COMPUTATIONNISME (Cf. Cognitives*-Sciences)

CONCEPT

CONCEPTUALISME

CONDITIONS AUX LIMITES

Conditions sur les valeurs des observables aux limites spatiales d'un système nécessaires pour la bonne spécification du système.

CONDITIONS INITIALES

CONGRES SOLVAY

CONJECTURE (Cf. Postulat*)

CONNAISSANCE

La connaissance est une forme d'existence et de systématisation des résultats de l'activité de l'homme, ensemble des processus, procédures et méthodes d'acquisition de données sur les phénomènes de la nature et les lois du monde objectif ou subjectif. La connaissance permet à l'homme d'organiser son activité et de résoudre les différents problèmes que celle-ci pose. C'est une image subjective de la réalité* sous forme de concepts* et de représentations*. C'est un moment essentiel dans la constitution de la personnalité propre ; la connaissance modifie le sujet. C'est de l'information* soumise à certains critères de vérité*. La théorie de la connaissance est appelée gnoséologie*.

Selon les cultures et les époques historiques, l'idéal de la connaissance varie. Ainsi en Europe occidentale au cours du Moyen – Age est apparu un nouvel idéal de la connaissance par l'action, opposé à l'idéal d'une connaissance contemplative. Idéal résumé par la fameuse formule de Vico* : *verum et factum convertuntur* (Cf. Vérité*, Modernité*-Origines de la). Ce nouvel idéal se positionnait avec force face à la démarche purement spéculative ancienne. Ce qui caractérisait la gnoséologie* et l'épistémologie* dans l'Antiquité et au Moyen-âge était leur caractère perceptif : que la connaissance soit acquise par abstraction à partir des données sensorielles, par illumination ou par introspection, connaissance et vérité* sont trouvées et non pas construites. Implicitement ou explicitement la plupart des « nouvelles sciences » du XVII^e siècle supposent une théorie de la connaissance constructive. L'empirisme expérimental et le constructivisme* de la science occidentale en découlent. Les critères de vérité se trouvent dans les actes et non dans les discours. Le blanc dit au colonisé : j'ai raison parce que je construit des armes et des machines. C'est la faillite historique des régimes politiques « communistes » qui engendre une désaffection vis-à-vis du marxisme*. Il faut enterrer Lénine, mais sauver Marx*.

Nous n'avons aucune manière de fixer les limites de notre connaissance en tant qu'être humain. Il se peut que ces limites soient déjà parfois atteintes en microphysique, en biologie ou en cosmologie. Il reste pourtant bien des choses à la portée de notre connaissance.

Il est troublant que la théorie physique la plus en vue du XX^e siècle, la mécanique quantique, ait recours à la notion de connaissance, en affirmant que l'état* constitue notre connaissance du système. En

passant sous silence toutes les modalités d'acquisition de la connaissance et en supposant un sujet connaissant abstrait.

Les révolutions conceptuelles créées par la mécanique quantique* avec la notion de mesure* et la théorie des systèmes dynamiques* avec la notion de chaos* déterministe, bouleverse la notion de lois de la nature* en introduisant la connaissance dans la formulation même de ces lois. La formulation des lois dépend de la précision des connaissances.

CONNAISSANCE COMMUNE (Cf. Sens commun*)

CONNAISSANCE SCIENTIFIQUE

La connaissance scientifique se distingue de la connaissance commune* par le recours systématique à l'examen de situations reproductibles (objectivité*) et par une mise en forme théorique de caractère apodictique*(universalité*). C'est l'extraordinaire avalanche de faits et de phénomènes reproductibles et leur inclusion dans un discours spécifiquement organisé, qui a créé le sentiment d'une distinction entre connaissance commune* et connaissance scientifique. L'épistémologie* est précisément une théorie de la connaissance scientifique et non pas une théorie générale de la connaissance, la gnoséologie*. Selon l'épistémologie, la connaissance scientifique est la vraie connaissance, et la philosophie a pour but de manifester cette vérité, même si c'est pour la borner aux phénomènes et ne pas condamner nécessairement toute connaissance transcendante*. On peut dire que le criticisme de Kant* et le positivisme* ont ainsi conçu leur mission.

La connaissance scientifique a un caractère souvent indirect, ses données sont plutôt le résultat d'un discours que l'observation naïve des phénomènes. La connaissance scientifique est selon le mot de Leibniz pour les mathématiques, une exploration des possibles*. Elle élargit donc de manière dramatique la connaissance commune. Elle le fait en particulier en mobilisant le non-actuel* dans l'exercice de la pensée objective. Le non actuel ne s'oppose pas au réel. Le réel de la science est un réel expliqué à l'aide de modèles abstraits établis grâce au recours à des catégories du non actuel : le virtuel*, le possible* et le probable*, qui de nature épistémique, est une qualification de nos connaissances, reflétant le degré de notre attente de l'actuel. C'est ce qui n'a pas lieu qui explique ce qui a lieu.

Malgré la domination certaine de la méthode objective, inaugurée par Galilée et Descartes dans leur mathématisation de la connaissance de la nature, la connaissance scientifique n'exclue pas tout subjectivisme*. Il suffit de rappeler l'atmosphère intellectuelle du kantisme* où ont évolués les savants allemands pendant près de deux siècles. Témoins aujourd'hui la coexistence entre deux conceptions de l'origine des probabilités (Probabilité* –Interprétation de la) ou le parfum de subjectivisme qui règne sur la mécanique quantique* dans son usage du terme d'observateur*.les propriétés géométriques des

La phénoménologie transcendantale* cherche à fonder la connaissance scientifique, objective et universelle, par une démarche transcendantale à partir de la connaissance commune*.

CONNEXION

Concept de la géométrie différentielle* lié à la notion de transport parallèle généralisé sur une surface. La connexion est un type de liaison entre des objets géométriques rapportés à différents points de l'espace. La connexion caractérise les propriétés géométriques des transformations des espaces tangents de point à point. On peut ainsi comparer les formes géométriques d'objets se trouvant dans des espaces tangents en deux points différents.

La géométrie différentielle, héritière contemporaine du calcul infinitésimal du 17ème siècle, apparaît aujourd'hui comme le langage le plus direct pour décrire la réalité physique. Ceci à toute échelle : la notion de « connexion », par exemple, est utilisée aussi bien pour construire des modèles d'Univers que pour décrire l'intérieur du proton. Rien de plus contraire à la sagesse du physicien ; et pourtant « ça marche ».

La notion de connexion, de par sa globalité, est adaptée à la représentation des champs. Ainsi un champ de jauge* peut être représenté comme une connexion dans un fibré vectoriel sur l'espace temps.

CONNECTIONNISME (Cf. Cognitives*-Sciences)

CONSCIENCE

La conscience est sans doute une des fonctions les plus élaborée du cerveau. Elle est sélective car la plupart des activités électriques du

cerveau sont inconscientes. Un inconscient physiologique qui n'a rien à voir avec l'inconscient méthodologique de la psychanalyse* de Sigmund Freud*.

On a insisté sur sa nature privée, accessible seulement du point de vue du sujet conscient, alors que les phénomènes physiques sont accessibles à tous.

On a noté son caractère ineffable, c'est-à-dire qu'on ne pouvait en rendre compte convenablement dans les termes du langage, contrairement aux propriétés des phénomènes physiques qui peuvent être exprimés avec précision en terme de variables physiques.

On doit aussi insister sur le fait que la conscience peut évoquer des situations physiques non présentes (virtuelles*) et même futures, aux fins de modifier le comportement présent . C'est sans doute ce qui la distingue le plus des systèmes physiques ordinaires, qui à la limite possèdent une mémoire mais n'ont pas la vision d'autres systèmes physiques, ni celle de leur futur, excluant par là toute finalité*. On peut se demander si l'on n'est pas en présence de deux systèmes fonctionnels.

Cet aspect subjectif de « ce que cela fait » d'avoir tel ou tel état conscient, on le nomme aussi l'aspect phénoménologique de la conscience. On parle également de «qualia» pour désigner plus spécifiquement toutes les impressions directes que nous avons des choses. Les qualia sont l'aspect expérientiel immédiat des sensations, ce que l'on peut maladroitement traduire par «la rougeur particulière du rouge d'une pomme», le «mordant d'une morsure» ou la «froideur de la glace». Certains étendent même le concept de qualia à nos désirs et nos pensées les plus élémentaires.

Ce problème auquel les neurosciences contemporaines tentent d'apporter des solutions, les philosophes s'y heurtent depuis des siècles. Le dualisme* et le matérialisme* sont peut-être les deux options philosophiques à avoir fait le plus coulé d'encre.

Pour le dualisme, le monde matériel existe bel et bien, mais les aspects subjectifs de la conscience sont de nature distincte et constituent l'autre grande substance* dont est faite le monde. Descartes* distinguait la « res extensa » (substance matérielle) de la « res cogitans » (substance pensante).

Pour le matérialisme seule la matière existe et la conscience n'est qu'un état de la matière. Mais cet état est si complexe que sa description constitue en soi un dualisme inavoué, faisant du cerveau le siège de mécanismes physiques ordinaires dont l'organisation est proprement extraordinaire. C'est l'hypothèse de travail des sciences cognitives* à travers ses différentes options.

De nombreux modèles influencés par la cybernétique* ont été proposés ainsi que des modèles basés sur les réseaux de neurones*.

L'avènement des neurosciences* comme une discipline importante des sciences cognitives a progressivement montré les failles de ces modèles localisés de la conscience. Ainsi, les données de l'imagerie cérébrale et de bien d'autres expériences ne s'accordent pas du tout avec l'idée que tous nos processus mentaux sont consciemment accessibles, que la conscience jaillit en un point du cerveau suite à une perception transparente du monde, et que nos comportements ont pour cause suffisante des intentions consciemment accessibles.

"L'idée qu'il existerait un centre spécial dans le cerveau est la plus mauvaise et la plus tenace de toutes les idées qui empoisonnent nos modes de pensée au sujet de la conscience", affirme par exemple le philosophe Daniel Dennett

)

Pour les nouveaux modèles, apparus depuis 1990, la conscience est une activité temporelle et une activité globale du cerveau. Comme le montre l'imagerie fonctionnelle RMN l'activité consciente mobilise de nombreuses parties du cerveau et se trouve liée à l'émotion. Le temps s'avère un attribut essentiel de la conscience. Entre le conscient et l'inconscient il y'a une différence profonde, l'un étant le siège de pulsations de faible amplitude et de fréquence élevée, l'autre ayant recours à des pulsations de grande amplitude et de fréquence basse.

Le modèle de l'espace de travail global conscient, développé par Changeux, Dehaene et Naccache, postule l'existence de deux compartiments anatomiques et fonctionnels distincts au sein de l'architecture de notre cerveau : une multitude de petits circuits qui élaborent à tout moment des représentations mentales inconscientes, en parallèle les uns des autres. Et dans le même temps un réseau neuronal dont le contenu correspondrait à la représentation mentale à chaque instant de l'expérience consciente.

Les neurones de ce vaste réseau sont interconnectés entre eux de telle façon qu'à chaque instant une seule voix prévaut malgré la multiplicité des échanges.

A chaque instant mille représentations inconscientes sont aux portes de l'espace global. Au mieux un seul de ces possibles sera sélectionné.

On peut alors représenter les échanges de la façon suivante. Soit nous sommes trop pris par un processus qui nous tient et nous sommes

sourds à des interventions extérieures, soit une brèche s'ouvre et un nouveau dialogue s'opère.

Les échanges qui se passent entre le réseau central et le processeur périphérique ont des durées de l'ordre de quelques dizaines de millièmes de seconde.

Le fait qu'une représentation inconsciente attire plus l'attention est sans doute très liée à deux facteurs

- La notion de familiarité, un peu à l'image d'une écoute dans un brouhaha de foule qui devient brusquement sélective en entendant son prénom.
- La pertinence de la représentation au niveau émotionnel, soit en signalant un danger ou en éveillant un souvenir marquant.

Enfin les "attentes" de notre espace de travail conscient orientent les prises de conscience vers certains contenus plutôt que d'autres. Le flux conscient serait ainsi une succession d'états stables. Et non un changement continu- d'où le choix du mot quantique. Le contenu de notre espace de travail conscient serait constamment mis à jour plusieurs fois par seconde.

Dans la réalité ce modèle simplifié est évidemment plus complexe. Le contenu de notre conscience est identifiable à chaque instant à l'activité neuronale cohérente et temporellement stabilisée de l'espace de travail global.

Au bout du compte la notion de conscience, vise à rendre compte de deux choses : le je suis conscient et je suis conscient de quelque chose. Etre conscient suppose de disposer d'un espace de travail "normal" alors que être conscient de quelque chose renvoie au fait que quelque chose apparaît issu d'un processeur périphérique.

C'est là un modèle de conscience parmi bien d'autres.

Mikhail Rabinovich, un pur produit de l'école de Gorky des systèmes dynamiques*, propose un modèle plus en accord avec sa compétence. Selon lui l'émotion et les fonctions cognitives sont des processus dynamiques transitoires, liés à l'interaction fonctionnelle des différents sous systèmes du cerveau, à leur concurrence et à leur synchronisation* au cours du temps. L'activité cérébrale est constituée d'états métastables*. Les régimes transitoires entre les états métastables sont structurellement stables*. Des principes écologiques de concurrence régissent ces régimes transitoires. On peut ainsi

imaginer un fonctionnement du cerveau comme système dynamique hors d'équilibre.

Mais tous ces modèles restent profondément qualitatifs et leur vérification demandera encore bien du travail quantitatif. Nous ne sommes pas encore entrés dans l'ère de la théorie* de la conscience.

CONSERVATION DE L'ENERGIE

CONSERVATION (LOIS DE)

Conservation est un terme de la physique correspondant à invariance* et symétrie* en mathématique et à identité* en logique. Tous ces sens engendrent des liens profonds entre les lois de la nature* et les principes de la connaissance*, confirmant le bien fondé de l'application des mathématiques pour la description de la nature.

Les lois de conservation sont au cœur de la physique et d'une vision du monde* où domine l'ordre*, la proportionnalité, la commensurabilité et l'égalité, l'équilibre entre les parties et certaines formes de stabilité. Ceci provient du lien fondamental qui existe entre les lois de conservation et la symétrie en physique* (Cf. Théorème de Noether*). La conservation en physique correspond à des invariants mathématiques.

Les lois de conservation sont des faits physiques selon lesquels les valeurs de certaines grandeurs physiques demeurent constantes au cours du temps dans des processus quelconques ou dans certaines classes de processus. Les lois de conservation permettent de juger du caractère du comportement des systèmes dont les lois du mouvement sont trop compliquées.

Les lois de conservation les plus importantes sont les lois de conservation de l'énergie*, de l'impulsion*, du moment de la quantité de mouvement* et de la charge*.

L'idée de la conservation est d'abord apparue comme une hypothèse philosophique sur l'existence d'invariance et de stabilité dans un monde en changement perpétuel. Une considération qui imprègne l'idéalisme de Platon* et les philosophies antiques qui considèrent la matière comme indestructible et non susceptible d'être créée, tout en reconnaissant que le mouvement incessant est l'attribut essentiel de cette matière. Ce n'est qu'aux XVII^e et XVIII^e siècles, avec l'apparition des formulations mathématiques de la mécanique, qu'apparaissent les lois de conservation de l'énergie mécanique (Leibniz*) et de la masse (Lavoisier*).

Il a fallu attendre le XIX^e siècle pour que Mayer, Joule et Helmholtz* établissent expérimentalement la loi de conservation de l'énergie dans les phénomènes non mécaniques. La conservation de la masse et de l'énergie étaient alors considérés comme la conservation de la matière et du mouvement. Mais la théorie de la relativité* en établissant une relation entre la masse et l'énergie a montré que l'on ne pouvait considérer une quantité de matière sans considérer son mouvement et ses interactions. C'est la loi de conservation de l'énergie-impulsion qui devient une loi fondamentale de la physique relativiste.

Les lois de conservation les plus importantes sont liées à la structure de l'espace-temps. Comme cette structure est profondément modifiée en relativité générale* où l'espace-temps devient courbe et inhomogène, ces lois de conservation perdent leur caractère habituel.

CONSERVATION (en Mécanique Quantique)

CONSTANTE COSMOLOGIQUE

Constante introduite par Einstein* dans ses équations d'interaction gravitationnelle (1915) pour construire un modèle statique de l'univers. Dans ce modèle les forces d'attraction de la matière ordinaire s'équilibrent avec les forces de répulsion gravitationnelles du vide*.

C'était une erreur* scientifique. Après la découverte de l'expansion de l'univers* Einstein a rejeté cette constante. Mais de nombreux spécialistes ont considéré qu'il fallait toujours écrire le terme avec la constante dans les équations d'Einstein, laissant à une théorie scientifique future et à des observations le soin d'en déterminer la signification. De nos jours, des considérations en liaison avec le vide quantique réhabilitent cette constante. La constante cosmologique est de nouveau au goût du jour : elle décrirait une force, encore hypothétique, qui accélérerait l'expansion de l'univers. Finalement, Einstein a bien commis une erreur en imaginant un Univers statique, mais sa constante cosmologique, elle, semble avoir une réalité physique.

CONSTANTE DE BOLTZMAN

CONSTANTE DE PLANCK (Cf. Planck-constante de*)

CONSTANTES UNIVERSELLES

Grandeurs physiques constantes entrant dans l'expression mathématique des lois fondamentales de la physique. Ce sont en général des attributs* caractéristiques de l'univers microphysique comme la vitesse de la lumière dans le vide ou la charge électrique de l'électron*, la constante de Planck*, le nombre d'Avogadro* ou la constante de Boltzmann*.

CONSTRUCTIVISME

Attitude épistémologique considérant que la connaissance ne consiste pas à prendre acte de la réalité mais se trouve le résultat d'une construction mentale. Nous construisons notre propre monde plutôt qu'il soit déterminé par une réalité extérieure. Une espèce de subjectivisme* radical qui suppose que la réalité n'existe pas pour nous autrement que par nos conceptions de la réalité, qui nous fournissent une réalité construite. Si l'on admet que cette réalité construite n'ouvre pas la voie, par approches successives, vers une réalité transcendante, on fait preuve de constructivisme radical. Il y a comme une autonomie* de la pensée, qui est un système ouvert, mais à l'intérieur duquel on n'a pas de moyens de connaître l'extérieur (à la Gödel* !). L'esprit est alors un solipsisme* épistémologique et non un solipsisme ontologique, qui voudrait que ce monde intérieur d'un seul esprit soit le seul qui existe.

Une attitude confortée par les exemples de la mécanique quantique* et de la perception des couleurs*, qui sont des constructions mentales donnant une cohérence aux faits expérimentaux.

Attitude opposée à l'empirisme* et au positivisme*.

Le constructivisme est dans une filiation avec le fictionalisme* de Vaihinger*, les jeux de langage de Wittgenstein* et surtout l'épistémologie génétique* de Piaget*. L'expression radicale du « Comme si* ».

Le constructivisme social* est un constructivisme mettant l'accent sur les facteurs socio-culturels dans la constitution du savoir scientifique.

CONSTRUCTIVISME MATHEMATIQUE

Courant de la pensée mathématique.

Si dans les mathématiques classiques on a affaire à des objets dont on connaît les propriétés sans se poser de question sur la manière de les construire, dans les mathématiques constructivistes il n'en est rien, et l'on se borne à étudier des objets constructibles, dont l'existence est assurée par une construction potentielle.

On exclut l'utilisation d'un infini* actuel, c.a.d. d'un infini achevé. L'infini apparaît sous forme d'une construction perpétuelle.

L'intuitionnisme* est une forme de constructivisme.

CONSTRUCTIVISME SOCIAL

Mouvement préconisant l'analyse des doctrines scientifiques à la lumière des faits socio-économiques et culturels. A la limite la Science doit être en totalité considérée comme une construction sociale et idéologique.

Le marxisme, entre autres, a joué un rôle essentiel dans l'apparition d'une telle attitude, par le poids qu'il donne aux facteurs socio-économiques dans la formation de la culture, tout en maintenant une attitude profondément réaliste* en science. On privilégie ainsi une conception externaliste du développement de la science, opposée à une conception de développement interne logique.

Ainsi l'analyse marxiste de la philosophie antique voit dans l'opposition fondamentale entre matière et idée le reflet de l'opposition entre esclaves et maîtres dans une société esclavagiste.

L'histoire de l'atomisme renvoie à l'existence des cités grecques et à leurs rapports marchands, et s'oppose, selon J. Needham, l'historien de la science chinoise, à l'organicisme* taoïste, reflet de la structure bureaucratique et rurale de la société chinoise.

Le développement du constructivisme social a été marqué par des textes influents. La communication du soviétique B.Hessen au Congrès d'Histoire des Sciences à Londres en 1931: "*Les racines sociales et économiques des Principia de Newton*". L'œuvre de T. Kuhn*, systématiquement externaliste. L'article de P. Forman: "*La culture de Weimar, la causalité et la mécanique quantique...*" (1971) où il décrit le climat culturel en Allemagne, qui a facilité l'acceptation de la notion d'acausalité développée en mécanique quantique. Le livre de A. Pickering : "*La construction des quarks; Une histoire sociologique de la physique des particules*" (1984), cherche à prouver que la physique des particules aujourd'hui, serait le résultat d'une "conspiration" entre expérimentateurs et théoriciens, pour accréditer une image du monde* qui aurait un sens culturel et social et permettrait d'organiser la pratique sociale (technologie) de la science. Le Vide tombe souvent sous le coup d'une telle analyse.

Les excès du constructivisme social, souvent liés au post-modernisme*, provoquent des réactions violentes de la part des physiciens réalistes (souvent marxistes d'ailleurs). On ne peut cependant nier l'intérêt de l'éclairage apporté par cette démarche.

CONTEXTE (Cf. Pragmatique*)

Le contexte, c'est l'environnement d'un fait ou d'un événement, les conditions générales et particulières de sa production, l'environnement linguistique d'un terme ou d'un énoncé. C'est un ensemble d'informations dont on dispose pour interpréter un fait. Cette notion suppose que l'on puisse séparer un phénomène de son contexte, ce qui n'est qu'une idéalisation. La mécanique quantique se charge de donner un exemple où cette séparation n'est pas opérante (Cf. Contextualité en mécanique quantique*).

Le contexte n'est pas forcément donné une fois pour toute mais construit par l'observateur ou le locuteur en fonction de ses informations ou de ses exigences.

CONTEXTUALISME

Attitude selon laquelle les phénomènes, les objets et les termes théoriques n'ont pas de signification propre mais n'en acquièrent que par le contexte* dans lequel ils s'insèrent.

CONTEXTUALITE (en Mécanique quantique)

La contextualité autrement dit l'inséparabilité du phénomène et du contexte expérimental de sa manifestation impose un grand nombre des caractéristiques structurales de la théorie quantique. Le caractère essentiel de la mécanique quantique est dans le fait que les observables ne sont pas des attributs* mais des phénomènes définis dans le contexte d'une mesure.

Dans toutes les sciences, comme dans beaucoup de situations ordinaires, on peut dire qu'à chaque contexte expérimental ou sensoriel correspond une gamme de phénomènes ou de déterminations possibles. Mais aussi longtemps que les contextes peuvent être conjoints, ou que les déterminations sont indifférentes à l'ordre d'intervention des contextes, rien n'empêche de fusionner les gammes de possibles en une seule gamme relative à un seul contexte global, puis de passer ce contexte sous silence et de traiter les éléments de la gamme comme s'ils traduisaient autant de déterminations

intrinsèques. La présupposition que rien n'empêche d'escamoter le contexte est automatiquement faite quand on se sert de propositions du langage ordinaire; car ces dernières permettent d'attribuer plusieurs déterminations au même objet comme si elles lui étaient propres. Il est important de noter qu'à cette présupposition et à ce mode de fonctionnement de la langue s'associent une logique classique, booléenne, et une théorie des probabilités classique, kolmogorovienne.

Mais l'apparition d'obstacles à la conjonction des contextes, ou le constat d'une absence d'indépendance des phénomènes vis-à-vis de l'ordre d'utilisation des contextes, comme c'est le cas en physique microscopique lorsqu'on essaye de mesurer des variables canoniquement conjuguées, rendent ces méthodes traditionnelles inutilisables. La stratégie consistant à ne pas tenir compte des contextes expérimentaux échoue, et l'explicitation de la contextualité des déterminations devient impérative.

Dans cette situation qu'affronte la physique quantique, la logique booléenne* et les probabilités kolmogoroviennes* ne subsistent en première analyse que fragmentées en plusieurs sous-logiques et plusieurs sous-structures probabilistes, chacune d'entre elles étant associée à un contexte particulier. A chaque contexte expérimental s'associe une gamme de déterminations possibles et une gamme de propositions attributives qui relèvent d'une sous-logique classique, booléenne; et à chaque détermination choisie parmi l'ensemble des déterminations possibles correspondant à un contexte donné, peut être attaché un nombre réel qui obéit aux axiomes de la théorie des probabilités de Kolmogorov. Mais ces sous-logiques et ces sous-structures probabilistes ne peuvent pas fusionner, car elles dépendent de contextes distincts qui ne peuvent en général être conjoints. La réponse de la mécanique quantique à cette situation éclatée est la production d'un formalisme unitaire qui définit une logique quantique* différente de la logique booléenne* et un calcul de probabilité quantique* fondé sur les vecteurs d'état dans un espace de Hilbert*.

CONTINENTALE (PHILOSOPHIE)

La philosophie continentale est un terme utilisé pour désigner une des deux principales « traditions » de la philosophie occidentale contemporaine. Ce terme polémique est utilisé pour marquer une opposition à la tradition anglo-américaine, dite philosophie analytique*. Le conflit entre philosophie analytique et philosophie continentale est volontiers réduit à un conflit entre une philosophie

pro-science, l'analytique, et une philosophie antiscience et métaphysique dont Heidegger* représente la quintessence.

La philosophie continentale inclut la phénoménologie*, l'existentialisme*, l'herméneutique*, le structuralisme*, le post modernisme*, la théorie critique de l'Ecole de Francfort, la psychanalyse*, l'œuvre de Nietzsche* et celle de Kierkegaard*.

C'est souvent une philosophie allemande dans la tradition de Schelling, Fichte et Hegel*, reprise par Husserl* et Heidegger*.

CONTINGENCE (Cf. Accident)

De contingere-arriver accidentellement.

Caractère de ce qui peut être ou n'être pas. Un évènement est contingent lorsque son opposé n'implique aucune contradiction. Contingent est une modalité* qui s'oppose donc à nécessaire. Contingence et hasard font souvent cause commune dans leur opposition à la nécessité. Mais il semble qu'il faille donner aujourd'hui au mot hasard* un sens qui ne l'oppose pas à la nécessité, mais à la régularité.

On appelle futur contingent, ce qui est dans l'ordre des choses possibles, ce qui pourra se réaliser dans l'avenir, sans qu'il y ait ni nécessité ni certitude à cet égard.

CONTINU

Le continu s'oppose à l'atomisme* en une dialectique parfaite que l'on retrouve dans l'opposition entre l'infini* et le nombre*. C'est là un des terrains où l'intuition physique interagit sans cesse avec les conceptions mathématiques. A l'intervalle atomiste des nombres correspond le vide* continu entre les atomes.

Aristote* avait tenté dans sa Physique, de construire une théorie du monde fondée non sur le nombre, mais sur le continu. Un programme* continualiste. Ces problèmes ont largement été discutés par la philosophie médiévale latine et arabe. Citons par exemple le « Traité du continu » (1330) de Thomas Bradwardin et la « Traité des configurations des qualités et des mouvements » (1371) de Nicolas Oresme.

En fait la doctrine du continu appartient aux parties de la physique aristotélicienne qui n'ont jamais été contestées et n'ont même pas été mises en doute par les fondateurs de la science contemporaine. Ce qu'Aristote dit du continu appartient même aux fondements de la physique des temps nouveaux, y compris là où elle opère avec des hypothèses atomiques. Avant Planck* ces fondements n'ont jamais été considérés dans toutes leurs conséquences, qui auraient pu mener à

rejeter le principe de continuité de l'espace et du temps, fondamental pour les hypothèses essentielles de Galilée* et de Newton*. Seule l'hypothèse quantique de Planck mène au-delà de l'horizon dessiné par la théorie aristotélicienne du continu (Cf. Quantification de l'espace temps*).

La création du calcul différentiel et intégral au XVIIème siècle, son développement au XVIIIème et sa fondation au XIXème, montre d'une façon convaincante qu'à travers toute l'histoire des mathématiques règne l'idée du dépassement de la différence entre le caractère discret du nombre* et la nature continue des grandeurs géométriques. Mais la pleine formulation du problème de l'infini* mathématique devra attendre la théorie des ensembles* de Cantor*.

Toute cette discussion s'articule autour des paradoxes de Zénon d'Elée* qui continuent d'alimenter le débat jusqu'aujourd'hui (Cf. Analyse non standard*).

CONTRADICTION

Proposition toujours (nécessairement) fautive. C'est le cas d'une proposition qui implique à la fois affirmation et négation, puisqu'une même chose ne peut être et n'être pas à la fois. Leibniz* a fait usage du principe de non contradiction.

CONTRAVARIANCE

CONTREFACTUEL (ou Contrafactuel)

Se dit de ce qui est contraire aux faits. Un énoncé faux, contraire aux faits du monde réel. On distingue le monde factuel (ce qui est), le monde contrefactuel (ce qui n'est pas en ayant pu être ou ne peut pas être), le monde du possible (ce qui pourrait être). Un conditionnel contraire aux faits est un conditionnel contrefactuel : « Si les poules avaient des dents... ». Quand une proposition possible est avérée ou infirmée, elle passe alors au monde factuel (et/ou contrefactuel).

En physique des événements contrefactuels sont des événements qui auraient pu se produire mais ne se sont pas produits.

En physique quantique des événements contrefactuels peuvent influencer sur les résultats d'une expérience. Un événement qui aurait pu se produire et ne l'a pas fait a des conséquences physiquement observables.

CONTROLE

CONTROLE DU CHAOS**CONTROLE OPTIMAL****CONVENTIONNALISME**

Attitude épistémologique considérant que les termes et les discours d'une théorie scientifique ne sont ni des a priori nécessaires (Kant*) ni des nécessités empiriques (empirisme*), mais des conventions commodes pour la description des phénomènes. Une théorie physique n'est pas l'expression exacte de la réalité, mais simplement un moyen de représenter les phénomènes, une langue commode pour les exprimer. Différentes théories sont alors comme différents points de vue, et le choix entre elles ne s'impose pas. C'est ce qu'Henri Poincaré soutenait à propos de la géométrie euclidienne et non-euclidienne. C'est considérer que la science n'a qu'une vertu descriptive et abandonner à la métaphysique toute démarche explicative.

CONVEXITE**CONVOLUTION****COOPERATIF (PHENOMENE)****COORDONNEES**

Nombres définis par la position d'un point dans le plan, une surface ou l'espace, et permettant de repérer ce point par rapport à une figure géométrique simple, le système de coordonnées, dont le système d'axes rectangulaires est l'exemple fondamental. D'abord utilisé en astronomie, ce repérage a été étendu au plan au XIV^{ème} siècle par Nicolas Oresme définissant ce que l'on appelle aujourd'hui l'abscisse et l'ordonnée. Au XVII^{ème} siècle l'emploi systématique des coordonnées, en particulier par Descartes*, a permis de traduire les problèmes de la géométrie en problèmes de l'analyse et vice versa.

COORDONNEES CARTESIENNES**COORDONNEES GENERALISEES**

Paramètres indépendants de dimension quelconque en nombre égal au nombre de degrés de liberté* d'un système mécanique et déterminant de manière unique la position du système. Le mouvement

de ce système est défini par autant d'équations d'évolution temporelle, avec des vitesses généralisées ;. Les coordonnées généralisées sont utilisées pour la résolution de nombreux problèmes en particulier lorsque le système est soumis à des liaisons qui limitent son mouvement. Dans ce cas on diminue ainsi considérablement le nombre d'équations décrivant le mouvement par rapport à la description en coordonnées cartésiennes*.

CORDES (Théorie des)

L'idée de base derrière la théorie des cordes est le remplacement des particules ponctuelles de la théorie quantique des champs ordinaire par des objets étendus à une dimension appelés cordes (en anglais strings) . Ces cordes doivent en fait être définies dans un espace à plus de dimensions que l'espace tridimensionnel habituel (espace interne*). La plupart des théories utilisent un espace à 9 dimensions et une dimension temporelle. Les cordes peuvent être ouvertes ou fermées et ont une tension caractéristique qui leur donne un spectre de vibrations. Les différents modes de vibrations correspondent à différentes particules dont le graviton.

La théorie des cordes souffre de la présence d'un grand nombre d'états fondamentaux ou états de vide sans critères de choix disponibles. Il n'y a pas de preuves expérimentales de la théorie des cordes.

CORPS

Pour un être humain, le corps est une donnée première en permanente reconquête. C'est une référence mouvante, en perpétuel devenir, objets de toutes les reconstructions. Il est l'objet d'une ambiguïté déconcertante.

Le corps est au cœur de toutes nos images. Il permet de figurer le visible à l'image de soi même. Vécu comme une réalité permanente il est le modèle de l'objet géométrique. Le modèle de toutes les invariances et de toutes les stationnarités.

Vécu comme une construction physiologique et mentale qui évolue sans cesse, il est le modèle de tout ce qui se transforme en gardant une identité. Stabilité structurelle* du corps.

CORPS/ESPRIT

CORPS NOIR (RAYONNEMENT DU)

CORPUSCULE

CORRECTIONS RADIATIVES (en électrodynamique quantique*)

C'est la modification en électrodynamique quantique* de certaines grandeurs physiques et de la section de certain processus par suite de l'interaction des particules chargées liées avec leur champ électromagnétique propre. Ces corrections sont obtenues par la théorie des perturbations* appliquée à l'interaction de la particule avec son champ. Les termes de la série de perturbation sont représentables par les diagrammes de Feynmann* et mettent en jeu des particules virtuelles* : émission et absorption de photons virtuels par la particule ce qui provoque la modification de la masse effective de l'électron et l'apparition du moment magnétique anormal*, création et annihilation de paires virtuelles électron-positron dans le vide, dite polarisation du vide*, ce qui a pour effet d'écranter le potentiel coulombien du noyau.

CORRELATION

La corrélation est la relation qui existe entre les caractères de deux objets ou de deux évènements sans avoir en général une formulation fonctionnelle explicite (Cf. Supervénience*). Elle mesure leur dépendance réciproque. La présence de certains traits dans une partie implique l'existence de certains autres traits dans l'autre. La connaissance d'une partie entraîne une certaine connaissance de l'autre. La recherche de corrélations représente souvent un palliatif à l'impossibilité d'établir des relations de cause à effet. On se rabat alors sur la confrontation de deux phénomènes pour voir s'il apparait que l'évolution de l'un est liée à celle de l'autre. La modélisation par ordinateur utilise la corrélation entre le modèle et les faits pour valider le modèle.

L'autocorrélation d'un signal* est la mesure des dépendances internes de ce signal, la corrélation entre les valeurs de ce signal.

En théorie des probabilités on définit la corrélation entre deux variables aléatoires* comme la valeur moyenne* du produit entre la différence entre chaque variable aléatoire et sa valeur moyenne. Pour des fonctions aléatoires* cette corrélation prend la forme d'une fonction de corrélation*.

Le coefficient de corrélation est le rapport de la corrélation au produit des racines carrées des dispersions* de chaque variable aléatoire. Si les variables aléatoires sont non corrélées elles sont indépendantes*, mais le contraire n'est en général pas vrai. Si le coefficient de corrélation est égal à zéro les variables aléatoires sont

dites non corrélées. S'il y'a entre les variables aléatoires une relation linéaire, le coefficient de corrélation est égal à + ou - 1. En général sa valeur absolue est inférieure à 1.

CORRELATION (FONCTION DE)

Pour deux fonctions aléatoires* c'est la fonction des deux paramètres définissant ces fonctions, calculée comme valeur moyenne du produit entre la différence entre chaque fonction aléatoire et sa valeur moyenne.

Pour des fonctions aléatoires stationnaires*, dont les propriétés statistiques sont invariantes par translation dans le temps, on peut introduire une fonction de corrélation ne dépendant que d'un paramètre, la différence entre les paramètres initiaux. C'est-à-dire pour des processus aléatoires stationnaires une fonction de corrélation, fonction ne dépendant pas du temps mais de l'intervalle de temps.

Pour une fonction stationnaire* on mesure l'autocorrélation* par une fonction d'autocorrélation* ne dépendant que de la durée

Les fonctions de corrélation sont utilisées pour l'étude des propriétés statistiques (prévision*, estimation*) et des propriétés énergétiques (spectre*) des fonctions aléatoires.

CORRELATION QUANTIQUE

Corrélation* entre les observations sur deux objets quantiques issus d'un système quantique dans un état enchevêtré*, et formant même spatialement séparés un système unique lui-même dans un état enchevêtré.

Cette corrélation, effet inattendu de la mécanique quantique semble nichée au cœur de celle-ci. Liée aux principes de symétrie des fonctions d'onde des systèmes de particules identiques, et donc au Principe de Pauli*, elle est le reflet d'un effet particulier stabilisant les édifices atomiques et moléculaires (Cf. Chimie quantique*-Energie de corrélation).

Insistons sur le fait que les corrélations ont lieu entre les mesures*et non pas entre les objets quantiques* eux-mêmes dont on ne sait rien en dehors des mesures.

Les corrélations quantiques ont été observées dans de nombreuses expériences : Aspect (1982) pour une distance de 18 mètres, Gisin (1998) pour une distance de 10 kilomètres, dans les deux cas pour des photons. Plusieurs autres expériences mettaient en jeu des ions piégés ou des ensembles d'atomes.

Une grande partie des expériences de ces dernières décennies reposent sur des paires de photons dites « enchevêtrées* » issues d'une dissociation paramétrique au travers d'un matériau non-linéaire de type quadratique. Elles visent à démontrer l'impossibilité de faire une mesure sur un des photons sans que cette action soit immédiatement perçue dans une mesure sur son jumeau (Cf. Optique non linéaire*)

Les corrélations quantiques prévues par la mécanique quantique existent et ne peuvent s'expliquer de manière classique par une cause commune ou l'envoi d'un signal. Selon Bell* aucun système de variables cachées* locales* ne peut reproduire ces corrélations. Tout se passe comme si les particules enchevêtrées, même distantes, ne formaient qu'un seul et même système. Ceci remet en cause nos conceptions de l'espace temps*.

Alliées à la superposition des états* les corrélations quantiques ouvrent de nouvelles voies expérimentales qui apparaissent dans la cryptographie quantique* ou la téléportation quantique*. Un nouveau domaine apparaît : l'information quantique*.

L'absence d'explications* ordinaires pour la nature extraordinaire des corrélations quantiques peut laisser penser que l'on a véritablement atteint là un niveau ultime fondamental de la nature, justifiant ainsi que la Physical Review ait remplacé sa rubrique de tête « *General physics* » par « *Quantum information* ». Mais ne proclamons pas trop tôt la fin de la physique théorique.

Dans sa dernière conférence John Bell* livrait son état d'âme :

« C'est juste un fait que les prédictions et les expériences de la mécanique quantique violent mes inégalités.. C'est juste un fait brutal de la nature qui fait échouer le programme d'Einstein. Dommage pour Einstein, mais faut-il se faire des soucis à cause de cela.

Je ne peux pas dire que l'action à distance est nécessaire en physique. Mais je peux dire que vous ne pouvez pas vous en passer .Vous ne pouvez pas séparer ce qui se passe en un endroit de ce qui se passe en un autre. Ces évènements doivent être d'une certaine façon décrits et expliqués ensemble. »

Bell donne trois raisons de ne pas se faire de soucis.

La non localité est inévitable même si elle ressemble à de l'action à distance.

Du fait que les évènements sont spatialement séparés, l'un ou l'autre peut se produire le premier dans un repère relativiste, si bien que l'on ne peut pas dire qu'il y'a une connection « causale » entre eux.

Aucun signal supralumineux ne peut être envoyé en utilisant l'enchevêtrement et la non localité.

Tout ceci souligne la grandeur et la misère de la mécanique quantique. Elle a révélé de nombreux faits expérimentaux insoupçonnés. Mais elle est incapable de donner une description de la nature microphysique en elle-même (en dehors des observations) mis à part l'hypothèse d'une onde comme élément constitutif de la particule. Mais on est jamais allé au-delà de cette prédiction de Louis de Broglie*.

CORRESPONDANCE (PRINCIPE DE)

COSMISME

Du grec kosmos-univers organisé et kosma-embellissement. Philosophie cosmologique* ou vision du monde* philosophique, fondée sur la connaissance du Cosmos* et sur la représentation de l'homme comme « citoyen du monde » ou la conception de l'analogie du microcosme et du macrocosme. Philosophie liée aux conceptions grecques anciennes du monde comme ensemble structurellement organisé et ordonné. Pythagore* considérait le cosmos comme un universum, Héraclite* le voyait comme une construction. Chez Platon* le cosmos est une partie ordonnée de l'univers opposée au chaos. Le gnosticisme*, appuyé sur la base de l'idée judéo-chrétienne du péché et de la chute de l'homme, considérait le cosmos comme la création d'un démiurge méchant et voyait le devoir de l'homme dans la libération de l'esprit à partir de la matière. Au Moyen Age Copernic* et Bruno* voyaient le cosmos comme un ensemble de mondes habités. Dans les systèmes religieux le cosmisme est partie intégrante de la théologie. Dans les doctrines ésotériques* (kabbale*, théosophie*) le cosmisme est lié à des connaissances astrologiques sur l'univers et l'homme, ce dernier reflétant corporellement et spirituellement le ciel des astres.

Une des manifestations du cosmisme se trouve dans le conflit entre les partisans du géocentrisme et ceux de l'héliocentrisme.

Dans la science, la doctrine du cosmisme est fondée sur les théories de la naissance et de l'évolution de l'univers. La conception de Kant* Laplace* sur la formation du système solaire par condensation de masses poussiéreuses. La théorie de l'expansion ou de la contraction de l'univers de Friedman et la confirmation de l'expansion de l'univers* par Hubble fondent la cosmologie* contemporaine avec l'appui de la théorie de la relativité générale*

COSMOLOGIE

Science de la structure et de l'évolution de l'univers dans sa totalité.

Pendant des millénaires on a posé les questions suivantes : « quelle est la structure de l'univers ? », « l'univers a-t-il toujours existé ? » « l'univers a-t-il une fin ? ». Ces questions n'ont pris un éclairage nouveau qu'au XX ème siècle grâce à l'emploi de télescopes puissants, de radiotélescopes, de vaisseaux spatiaux et l'élaboration de nouvelles théories fondamentales- la théorie de la relativité* et la mécanique quantique*. La cosmologie moderne est née, créatrice de modèles cosmologiques comme le modèle du Big Bang*, tirant arguments de faits physiques indiscutables comme la récession des galaxies* ou le rayonnement résiduel* à $2^{\circ}7$ K.

La cosmologie est née avec la reconnaissance de l'existence du système solaire sous sa forme moderne où le soleil occupe le centre et où la Terre n'est qu'une planète parmi les autres, avec son satellite la Lune. Vénus, Jupiter, Uranus, Saturne et Neptune, Mercure, Mars, Pluton. C'est la révolution de Copernic* et de Galilée*. Le système solaire a été exploré par les vaisseaux spatiaux Voyager 1 et Voyager 2 (1977). Ils ont découverts 22 nouveaux satellites : 3 pour Jupiter, 3 pour Saturne, 10 pour Uranus et 6 pour Neptune.

Les distances deviennent si grandes que plutôt de les exprimer en millions ou milliards de kilomètres on les exprime en années lumières (distance parcourue par la lumière en une année).

Au delà du système solaire se trouvent des étoiles, qui forment un système lié par la gravitation. L'ensemble forme une galaxie, la Voie Lactée, qui contient le système solaire et quelques centaines de milliards d'étoiles avec une extension de l'ordre de 100 000 années lumière. Il existe dans l'univers de nombreuses régions où naissent et se concentrent les étoiles, Quelques centaines de milliards de galaxies pour l'univers observable, beaucoup plus pour l'univers tout entier dont on ne connaît pas la taille. Devant cette prolifération de galaxies dans l'univers il semble naturel de postuler que l'univers est homogène et isotrope, et que toutes les observations faites sur la terre ou dans son environnement immédiat, sont en droit extrapolables à l'ensemble de l'univers. C'est là le principe cosmologique*, fondement de la cosmologie.

Toute considération cosmologique ne peut que s'appuyer sur une théorie de la gravitation*, seule force susceptible d'agir sur un ensemble aussi vaste et aussi peuplé d'objets. C'est l'attraction universelle selon Newton*. La relativité générale* d'Einstein* (1915)

ouvre la possibilité d'une cosmologie scientifique. La gravitation y est remplacée par une propriété intrinsèque de l'espace-temps, sa courbure, qui trahit la présence de matière. Dès sa création Einstein tenta d'appliquer la relativité générale à l'univers dans sa totalité mais sans succès. En réalité le tout premier modèle cosmologique à avoir été proposé, par Albert Einstein lui-même, ne contenait pas d'expansion de l'univers. Ce modèle, désormais appelé univers d'Einstein est statique, et avait été bâti par Einstein de façon à ne pas comporter de phase d'expansion. C'est dans ce modèle qu'il avait introduit une constante cosmologique* ad hoc pour éviter le problème. Il regrettera plus tard cette construction, la qualifiant de « plus grande erreur de sa vie ». C'est le mathématicien russe Alexandre Friedmann (1888-1925) qui a construit le premier une théorie cosmologique relativiste correcte en 1922-1924.

En résolvant les équations de la théorie de la gravitation d'Einstein, en tenant compte du principe cosmologique, Friedman a montré que l'univers ne peut rester inchangé et que selon les conditions initiales il doit se dilater ou se contracter. Il a donné la première évaluation vraisemblable de l'âge de l'univers. Friedman fut le premier après des millénaires à mettre en doute le caractère statique de l'univers. Proposition si inhabituelle que dans un premier temps Einstein lui-même n'y cru pas. Il pose pour le premier le problème du début et de la fin de l'univers de façon scientifique.

En 1927 l'abbé Georges Lemaître (1894-1966) arriva aux mêmes conclusions que Friedman. Mais avec de surcroît une confrontation avec les résultats expérimentaux obtenus par Hubble en 1923-1924 (récession des galaxies*), indiquant pour la première fois que le déplacement vers le rouge dans le spectre des galaxies révèle l'expansion de l'univers*.

L'évaluation des travaux de Friedman et Lemaître a lieu ici après coup, car sur le moment ils n'attirèrent pas l'attention et leurs travaux ont été longtemps sous estimés. Jusque vers les années 60 le développement de la cosmologie a souffert de ce que la relativité générale était considérée comme une activité spéculative et n'était pas entrée dans le courant majeur de la physique théorique. La découverte du rayonnement cosmique diffus en 1965, interprété comme un rayonnement résiduel* du Big Bang* a eu un effet choc pour le développement d'une cosmologie physique. Les physiciens américains J.A. Wheeler* et soviétique J. B. Zeldovich* constituent des écoles d'astrophysique théorique relativiste. Ce dernier publie en 1967 avec I.D. Novikov un ouvrage pionnier *Astrophysique relativiste*. On assiste

en 1973 à la parution du premier traité moderne sur la relativité générale, le chef d'œuvre de Charles W. Misner, Kip S. Thorne and John A. Wheeler *Gravitation*, et en 1975 du livre de Jacob B. Zeldovich et Igor D. Novikov *Structure et évolution de l'univers*.

Nous assistons alors au développement de théories cosmologiques, dont la théorie du Big Bang* est le prototype. L'univers statique est définitivement disqualifié. L'univers est en développement. L'univers a donc une origine. Le défaut de ces modèles cosmologiques qui rendent pourtant compte de nombreuses observations, est de ne pas tenir compte de 95% de l'univers non identifié par des observations. On parle de matière noire* et d'énergie noire, pour désigner des réalités qui nous échappent totalement. Sauf que des observations montrent que l'expansion de l'univers* est une expansion accélérée, ce qui suppose l'existence d'une énergie répulsive qui remplit l'univers, l'énergie noire. Dans les équations d'Einstein cela revient à introduire une constante cosmologique*.

La théorie du Big Bang* décrit une expansion de l'univers à partir d'un état infiniment chaud et dense. Mais les équations ne permettent que de remonter au plus près du Big Bang et ne décrivent pas ce qu'il advient dans un temps inférieur au temps de Planck, où il faut jumeler mécanique quantique et relativité générale. Problème non résolu à ce jour par la cosmologie quantique*. Tous les scénarios proposés se bornent à juxtaposer ces deux théories de base sans les mêler intimement.

Les scénarios existants sont autant de théories sous-déterminées par les données expérimentales selon la thèse de Duhem-Quine*. A une théorie comme celle du big bang s'opposent les théories qui font remonter la naissance de l'univers à une fluctuation quantique du vide. Ces théories supposent qu'à l'origine l'univers est invisible dans un état de vide quantique. Un scénario propose même un modèle semi-classique où l'univers passe de l'état vide à un état excité par absorption d'énergie provenant de l'expansion de l'univers. L'univers aurait donc toujours existé sous forme potentielle. Les cosmologistes rivalisent d'imagination pour décrire des scénarios où la notion même de création leur échappe toujours. Avant toute chose il y a encore un avant. Pas de création ex nihilo.

La cosmologie est un champ d'application de la relativité générale. Mais Platon dans le *Timée* nous avait prévenu :

« Si donc, en beaucoup de points, sur beaucoup de questions concernant les Dieux et la naissance du monde, nous ne parvenons pas à nous rendre capables d'apporter des raisonnements cohérents de tout point et poussés à la dernière exactitude, ne vous en étonnez point.

Mais si nous vous en apportons qui ne le cèdent à aucun autre en vraisemblance, il faut nous en féliciter, nous rappelant que.....nous ne sommes que des hommes, en sorte qu'il nous suffit d'accepter en ces matière un conte vraisemblable ».

COSMOLOGIE QUANTIQUE

La cosmologie quantique est l'application de la théorie quantique à l'univers tout entier. Ce qui peut paraître absurde, car des systèmes macro physiques comme l'univers obéissent à des lois classiques* et non quantiques. La théorie de la relativité générale d'Einstein est une théorie classique qui décrit bien l'évolution de l'univers des premières secondes jusqu'à maintenant. Mais la théorie de la relativité générale est inconsistante avec les principes de la théorie quantique, car l'une prétend décrire l'univers réel tandis que l'autre se borne à décrire les observations sur l'univers microphysique. Aussi la théorie de la relativité générale n'est pas une théorie convenable pour des processus physiques se produisant à de très petites échelles de longueur ou de temps. Ceci requiert une théorie de la gravitation quantique* élément essentiel à toute cosmologie quantique.

COSMOLOGIQUE (CONSTANTE)

COSMOLOGIQUE (PRINCIPE)

La cosmologie contemporaine admet comme hypothèse de base, ce que l'on nomme le principe cosmologique : à chaque instant tout observateur voit dans l'univers la même image quelque soit le point où il est situé et la direction où il regarde. C'est une hypothèse sur l'homogénéité et l'isotropie de l'univers.

Cette hypothèse a été explicitement proposée pour la première fois par Einstein* en 1917 mais elle avait déjà été faite par Nicolas de Cues* au XV^e siècle : « L'univers en mouvement perpétuel n'a ni centre, ni périphérie, ni haut, ni bas, il est homogène et les mêmes lois règnent dans ces différentes parties ». On doit aussi lui attribuer l'aphorisme célèbre : « L'univers est une sphère, dont le centre est partout et la périphérie nulle part » que l'on attribue parfois à Giordano Bruno* ou à Pascal*.

Ce principe relève d'une modélisation valable à grande échelle. En réalité à une échelle plus faible les galaxies, les étoiles, les planètes

et les êtres vivants manifestent des conditions physiques variables en différents points de l'univers

Ainsi l'univers ne doit pas tourner, n'a pas de centre et n'a pas de limites. Cette notion d'univers infini est comme la définition même de l'univers.

COSMONAUTIQUE

COSMOS

L'univers dans sa totalité.

Objet ordonné et structurellement organisé du cosmisme*, sujet à une dynamique propre et concept de base de la métaphysique*.

Le cosmos a un certain nombre des caractéristiques :

Une forme comme définition d'une apparence configurée

Une différenciation laissant définir des parties constituantes

Une structure résultant de la mise en ordre hiérarchique de ses éléments

L'existence d'un potentiel d'évolution immanent engendrant une dynamique cyclique et pulsatoire

L'asservissement à une mesure intérieure qui sert de principe d'organisation et d'évolution

Une perfection esthétique manifestant la beauté et l'harmonie. Chez Platon le cosmos est la plus belle des choses possibles.

Une rationalité et une prévisibilité.

Dans ce contexte le cosmos est souvent considéré comme sphérique, la forme la plus parfaite (Harmonie des sphères, chez Pythagore). Toute l'esthétique antique se définit par rapport au cosmos (Cf. Losev*)

Dans le cadre de la culture européenne on oppose souvent le cosmos au chaos comme un désordre informe. Le cosmos peut naître de l'organisation du chaos, ce qui en fait un chaos ordonné. L'idée du cosmos comme organisation harmonieuse du monde est si profondément ancrée dans la pensée européenne, qu'il existe une preuve cosmologique de l'existence de Dieu*.

La philosophie contemporaine a créé un mot nouveau « chaosmos » pour marquer le fait que chaos et cosmos sont inséparables, que le chaos est toujours présent dans le cosmos. Terme inventé par James Joyce et repris par Gilles Deleuze.

COULEUR

La couleur n'est pas un attribut* de la lumière ou des corps. C'est une propriété* révélée par le cerveau. La couleur n'existe pas dans la nature*, elle n'apparaît que lorsque l'on introduit le cerveau* et la conscience*. La lumière qui rentre dans l'œil va engendrer une cascade de phénomènes physico-chimiques, qui finissent par envoyer dans la conscience* tout à fait autre chose que la lumière entrante. La couleur ce n'est pas la longueur d'onde*. C'est l'interprétation par le cerveau comme couleur d'un spectre*d'émission* ou d'absorption*. La couleur est le résultat d'une élaboration complexe, et appartient par ses propriétés à un espace mental tout à fait différent de l'espace physique. Tout comme pour la perception des formes, où l'espace pictural n'est pas l'espace physique euclidien, l'espace des couleurs n'est pas non plus un espace physique euclidien. Le grand physicien Erwin Schrödinger* avait très bien compris le caractère particulier de la géométrie de l'espace des couleurs.

A cheval sur l'Art et la Science*, l'étude et l'emploi de la couleur ont mobilisé les plus grands artistes et les plus grands savants, tout en constituant le sujet de débats épistémologiques et philosophiques incessants. On ne peut cependant que regretter que la connaissance de la couleur reste un des parents pauvres de la culture contemporaine. Et ce d'autant plus que l'omniprésence de la couleur, banalisée par les technologies, tend à occulter l'ensemble des développements théoriques et conceptuels qui la concernent.

A ceux qui pensent que la couleur révèle la nature du monde et à ceux qui soutiennent -à juste titre d'ailleurs- qu'elle révèle la nature du cerveau (avec l'œil pour "éclairer") on a envie d'opposer ceux qui penseront un jour, qu'à travers la couleur la nature du cerveau révèle la nature du monde. Il y a là comme une boucle fermée essentielle, tout comme si, allant de la syntaxe* vers la pragmatique* en passant par la sémantique*, on refermait la pragmatique sur la syntaxe pour la justifier. Les signes et leur syntaxe ne valent que s'ils assurent une bonne correspondance avec le réel. Un clin d'œil à l'a priori de Kant* que Semir Zeki, le neurobiologiste, spécialiste bien connu de la vision des couleurs, ne se prive pas de suggérer :

"Plus sans doute qu'aucun autre aspect de la vision, son étude - celle de la couleur - nous force à modifier notre conception du rôle des aires sensorielles du cortex cérébral. Cette étude commence à nous faire comprendre que le cortex ne se borne pas à analyser les couleurs de notre environnement visuel. En fait il transforme l'information qu'il recueille pour créer des couleurs, qui deviennent des propriétés du cerveau et non du monde extérieur. Mais en même temps, le cerveau rapproche autant que possible ces constructions - les couleurs - des

constantes physiques dans la nature, et dans ce processus, il se rend aussi indépendant que possible de la multitude des modifications de l'environnement.

Pour faire écho aux lignes de conclusion de Charles Darwin dans son grand livre, il y a là une splendeur dans cette vision du cortex cérébral, qui en partant de l'information perpétuellement changeante qui lui parvient, distille les véritables constantes de la nature et construit la variété pratiquement infinie des couleurs qui, outre qu'elle agit comme mécanisme de signalisation, enrichit notre expérience du monde visuel''.

On ne peut cependant pas considérer le phénomène couleur comme purement individuel. La perception des couleurs, comme la perception en général est d'abord une activité collective et culturelle avant de prendre un sens individuel. Cette activité collective a des lois et se constitue en véritable paradigme.

L'activité perceptive constitue un processus actif et non passif, interactif et non isolé, cognitif et non purement visuel, de sorte que toute perception est en même temps un processus d'interprétation, lequel repose sur un savoir implicite ou explicite, qui n'est d'autre qu'une conséquence des conditions paradigmatiques qui règlent la perception à tel ou tel moment dans telle ou telle culture donnée.

Ainsi sous la perception des couleurs se cache une activité symbolique au même titre que le langage. La couleur est un langage.

Aussi ne faut-il pas s'étonner de voir apparaître des systèmes de classification des couleurs les unes par rapport aux autres, des systèmes chromatiques*. La notion de couleur complémentaire* y joue un rôle central. S'il y'a système chromatique, c'est que l'organisation des couleurs entre elles est déjà régi par un ensemble de catégories, de croyances qui participent de l'imaginaire de la couleur et règlent également ce qu'on appelle l'harmonie des couleurs. Un peintre juxtapose-t-il deux couleurs parce qu'elles lui plaisent ou pour satisfaire à un canon d'harmonie chromatique ? A moins qu'il n'ait intériorisé les règles d'harmonie qui prédominent à son époque et qui ont façonné son gout au point de les suivre ou de s'y opposer.

On prétend souvent que la couleur chez les peintres ne relève pas d'un langage mais de l'émotion, et échappe à toute analyse rationnelle. Bien des études montrent qu'il n'en est rien.

Toute la problématique de la classification des couleurs tourne autour des rapports entre les couleurs et la lumière et la couleur blanche.

Les considérations ordinaires sur la lumière blanche* répètent le point de vue de Newton pour interpréter ses expériences avec le prisme : la lumière blanche est un mélange de lumières colorées. La

lumière blanche est de ce fait non homogène et les lumières colorées en sont les constituants. Il est dommage que ce point de vue, justifié lorsque l'on se réfère à Newton, soit encore largement répandu même chez le physicien qui ne s'intéresse pas à la couleur. La physique moderne considère la lumière blanche non pas comme un mélange* mais comme une superposition*. La lumière blanche est homogène et se présente comme un processus aléatoire dont l'analyse de Fourier* fournit les lumières colorées. Le prisme révèle la structure mathématique de la lumière blanche.

Mais la perception des couleurs est liée à l'excitation dans l'œil de trois types de bâtonnets et non pas à une logique des longueurs d'onde. Des lumières de compositions spectrales* différentes peuvent être perçues comme une même couleur (couleurs métamères).

On distingue deux catégories de compositions des lumières, la synthèse additive par addition des lumières colorées et la synthèse soustractive par mélange de pigments colorés.

La lumière étant un phénomène électromagnétique ondulatoire deux types de lumières colorées peuvent s'additionner pour créer un nouveau phénomène électromagnétique complexe. L'œil analyse ce phénomène à travers son système de bâtonnets et lui attribue une couleur. C'est ce mécanisme qui est à l'origine de la reproduction des couleurs par addition de trois lumières colorées primaires. C'est la synthèse additive, superposition*, à l'œuvre dans les systèmes d'éclairage de scène. On parle de couleur lumière. (Cf. Photographie interférentielle de Lippman*).

La situation est tout autre lorsque l'on parle de la couleur de substances matérielles. Elle provient de l'absorption partielle de la lumière blanche par le matériau, d'où le terme soustractif. Dans le cas d'un mélange* physique de pigments les parties soustraites coexistent et c'est cette juxtaposition étendue à l'ensemble du mélange qui est interprétée comme couleur par le système visuel. On parle de couleur matière et de synthèse soustractive, par mélange*. C'est le cas des mélanges de pigments utilisés par les peintres.

Cette distinction entre superposition* et mélange* rendue possible par le caractère linéaire des équations de base, les équations de Maxwell*, se retrouvera en mécanique quantique à cause de la même propriété pour l'équation de Schrödinger*. Cette distinction a toujours été à l'origine de nombreuses confusions.

Remarquablement toutes les relations entre couleurs dans un système a en parallèle des relations analogues dans l'autre, en portant évidemment sur des couleurs différentes.

Deux couleurs sont dites complémentaires* lorsque leur addition (superposition*) donne l'aspect de la lumière blanche (blanc artificiel) ou leur mélange* (soustractif) donne l'aspect du gris ou du noir. Il existe des couleurs primaires* dont l'addition ou le mélange pondérés donne l'aspect de presque toutes autres couleurs du spectre. Ce sont le rouge, le vert, et le bleu en synthèse additive (système RGB) et du magenta, du cyan et du jaune en synthèse soustractive.

La loi dite de contraste simultané de Chevreul énonce que lorsque deux couleurs sont juxtaposées chaque couleur ajoute sa complémentaire à l'autre. C'est le gris qui modifie le moins une couleur. C'est pourquoi les imprimeurs de livres d'art utilisent souvent le gris comme fond et que les conservateurs du Louvre couvrent progressivement de gris les salles de peinture. Les amateurs privés de peinture n'en sont encore pas à peindre en gris les murs de leur salon !!

D'autre part, à partir de deux taches voisines de couleurs différentes, l'œil opère ce que l'on appelle un mélange optique, soit en fait une superposition. Ce principe a notamment été utilisé par les impressionnistes et les pointillistes. Au lieu d'employer un vert mélange sur la palette de jaune et de bleu (mélange mécanique), ils appliquaient sur la toile une touche de jaune juxtaposée à une touche de bleu, de façon à ce que la couleur se mélange par simple perception : d'où le terme mélange optique.

Cette découverte toujours valable, est abondamment utilisée dans les procédés de reproduction photomécanique (sérigraphie, imprimerie...). Les surfaces colorées sont décomposées en points ou en trames de couleurs séparées (trois couleurs primaires + le noir = la quadrichromie), qui se fondent dans l'œil du spectateur.

Le phénomène couleur est un phénomène largement perceptif et c'est ce qui fait sa complexité donnant lieu à une véritable science de la couleur. Il ne faut pas à propos de la couleur tomber dans le piège physicaliste*.

Du point de vue philosophique il existe un vaste débat sur la couleur pour savoir si la couleur appartient au corps ou si elle est en puissance* dans le corps.

Pour les physiciens qui ont créé la vision physique du monde depuis le début du XVI ème siècle, la couleur n'y a pas de place, ce qui ne les empêche pas de s'y intéresser. C'est le cas de Galilée*, Boyle*, Descartes*, Newton*, Young*, Maxwell* et Helmholtz*. Les physiciens contemporains s'intéressent peu à la couleur. Il est d'autant plus remarquable que l'un des plus grands d'entre eux, Schrödinger, se soit

trouvé engagé dans l'étude la couleur, lorsqu'il se tourna vers la fondation de la mécanique quantique en proposant sa célèbre équation. Cependant d'un point de vue physicien les couleurs ne dépendent pas de la perception mais sont des aspects intrinsèques et qualitatifs des surfaces physiques.

A cette position objectiviste* répondent des positions où la couleur dépend de l'observateur de manière physiologique ou sociale. Pour certains les couleurs sont des propriétés culturelles. Etre rouge pour un objet c'est satisfaire des critères qui permettent d'appliquer le prédicat "rouge".

La théorie de la couleur a ceci de commun avec la mécanique quantique d'être une logique de l'apparence.

Le problème de la couleur constitue un des grands thèmes de l'examen des rapports entre art et science*.

Précisons quelque peu le rapport du physicien et de la couleur.

Il faut reconnaître que le physicien lui même est souvent mal à l'aise devant la diversité des langages de l'optique. La lumière est l'objet de différents discours qui se développent souvent de manière autonome avec un passage problématique de l'un à l'autre. Il n'y a pas une Optique, mais de nombreuses Optiques. L'optique géométrique, l'optique ondulatoire (électromagnétique), l'optique de Fourier*, l'optique statistique*, l'optique informationnelle, l'optique semi classique (lumière classique agissant sur la matière quantifiée), l'optique quantique* (lumière quantifiée), sans parler de l'optique non linéaire ou de l'optique cohérente des lasers. Et pour couronner le tout une optique physiologique*.

Selon ses besoins le physicien adopte le langage propre à chacun de ces territoires, et à du mal à passer d'un langage à l'autre.

Le problème de la couleur vient taquiner tous ces territoires à la fois, et si certains formalismes mathématiques sont sans ambiguïté, les concepts ont souvent du mal à se raccorder les uns aux autres.

Le plus célèbre de ces raccords problématiques se trouve dans la fameuse relation de Planck, fondant la théorie quantique en reliant l'énergie à la fréquence $E = h \nu$. Relation phénoménologique dont le sens physique profond échappe, même si elle fonde la théorie du photon*, en affirmant le mystérieux dualisme onde corpuscule*. Les discours reliant énergie et fréquence sont toujours délicats et contiennent des pièges où tombent la plupart de nos contemporains. Ainsi dans un document rédigé par un cardiologue pratiquant l'ablation de flutter par radiofréquences et que l'on fait signer au patient, on décrit l'intervention comme l'application d'une énergie appelée radiofréquence.

Explication faite, le cardiologue reconnaît, mais s'en moque au fond de lui même.

Il ne faut pas en vouloir aux peintres s'ils se perdent dans tout cela et en font autant, tout en prétendant s'abriter derrière des données scientifiques.

C'est que l'onde lumineuse est caractérisée comme toute onde par la fréquence des vibrations (du champ électromagnétique), la vitesse de phase (vitesse de propagation de la phase, vitesse de propagation du signal lumineux, qui vaut c , la fameuse constante universelle, pour toutes les ondes électromagnétiques) et la vitesse de groupe (vitesse de propagation de l'énergie) égale à c dans le vide. Cette dernière vitesse est plus petite que c dans un milieu autre que le vide, parce que le milieu assure la propagation de l'onde par des absorptions et des réémissions successives qui freinent la progression de l'énergie. C'est ce qui définit la réfringence ou coefficient de réfraction du milieu $n = c / \text{vitesse de groupe}$. La vitesse de groupe tout comme l'indice de réfraction dépendent de la fréquence. C'est l'augmentation de l'indice de réfraction avec la fréquence qui « explique phénoménologiquement » la dispersion de la lumière blanche par le prisme. Mais il faut noter que si le violet est plus dispersé que le rouge, c'est dû à ce que les énergies mises en jeu dans l'interaction avec la matière sont plus grande et de ce fait la propagation en est plus lente. On voit là combien le terme de « vitesse de vibration » utilisé parfois pour désigner la fréquence est malheureux, car plus cette vitesse est grande plus l'onde lumineuse est lente dans un milieu différent du vide.

Il est donc essentiel de prendre en considération les mécanismes microphysiques d'interaction de la lumière avec la matière. En particulier si l'on veut rendre compte du statut du spectre visible où l'on passe des énergies qui se bornent à faire vibrer les molécules (infra-rouge) à des énergies qui excitent les électrons (visible et ultra-violet). Ce ne sont pas les qualités propres de la lumière qui sont mobilisées, l'infra rouge valant bien l'ultra violet, mais les possibilités d'interaction de la lumière avec la matière (et partant avec le système perceptif).

La grande philosophie de l'optique du XX^{ème} siècle est de comprendre que la lumière ne vaut pas tant comme objet que comme révélateur des possibilités de changement de la matière et comme intermédiaire des interactions entre les éléments matériels.

Peu importe la vibration, l'essentiel est de voir vibrer la matière sous son influence. Encore ne faut il jamais oublier que l'on n'observe pas la vibration directement, seule l'énergie se manifeste. On

n'observe jamais le champ mais le carré du champ, c.a.d. l'énergie. Et c'est cette énergie, ou du moins les échanges d'énergie que la théorie quantique affirme se produire par « paquets » (photons).

La théorie quantique a introduit une grande révolution culturelle en montrant que la lumière ne vaut qu'en tant que vecteur des échanges d'énergie et que ce sont les réponses de la matière aux sollicitations lumineuses qui font la richesse de l'optique. Cette philosophie ne pouvait s'affirmer au XIX^{ème} siècle, tout occupé par la théorie ondulatoire de la lumière. Fresnel* et Maxwell* y ont écrit une grande partie de l'optique moderne. Mais l'histoire ne s'arrête pas là et l'optique n'atteint sa maturité qu'avec l'étude des interactions lumière-matière, dont le pionnier est Gustav Kirchoff*, le héros de la spectroscopie* atomique. La lumière devient reine en révélant les spécificités structurales de la matière. Cela devenait de plus en plus clair à la fin du XIX^{ème} siècle et l'on peut regretter que les organisateurs de l'exposition « Les origines de l'art abstrait » (Musée d'Orsay. Hiver 2003) n'aient pas noté ce point essentiel de l'histoire de la lumière et de la couleur, en laissant s'exprimer sans commentaires une conception de la lumière-objet, propre au XIX^{ème} siècle, en passe de devenir caduque. Emboitant ainsi le pas aux impressionnistes mais affermissant de ce fait chez la plupart des visiteurs une vision fautive et dépassée du véritable statut de la lumière.

Si l'on a compris ce rôle de la lumière dans la nature, on ne pourra jamais imaginer que l'œil et le cerveau se bornent à enregistrer des phénomènes lumineux. Ce serait une exception invraisemblable. La lumière qui rentre dans l'œil va engendrer une cascade de phénomènes physico-chimiques, qui finissent par envoyer dans la conscience tout à fait autre chose que la lumière entrante. La couleur ce n'est pas la longueur d'onde c'est l'interprétation cérébrale d'un spectre*. La couleur est le résultat d'une élaboration complexe, et appartient par ses propriétés à un espace mental tout à fait différent de l'espace physique. Quand on se persuade que la lumière ne nous intéresse pas tant par ses attributs que par les réponses qu'elle suscite chez des observateurs (physiques ou humains), on ne se laissera plus prendre au mythe de la lumière blanche, « composée » de lumières colorées. La lumière blanche est un phénomène électromagnétique homogène et chaotique, où ne se discernent aucune oscillation périodique (et donc pas de fréquences). En fait ce qui la caractérise en un point donné, c'est l'absence totale de corrélation temporelle entre les événements électromagnétiques. La magie mathématique de la transformation de Fourier d'une telle absence de corrélation laisserait croire que toutes les fréquences du spectre sont présentes dans la

lumière blanche. Mathématiquement oui, physiquement non. C'est l'interaction de la lumière blanche avec un dispositif physique, se comportant comme un filtre, qui va concrétiser telle où telle fréquence possible du spectre mathématique et la laisser s'exprimer physiquement. Mathématiquement il existe d'ailleurs une infinité de représentations équivalentes et la représentation au moyen de vibrations périodiques ordinaires n'en est qu'une parmi tant d'autres, utile dans certaines circonstances physiques. De la même manière, un avion qui vole traduit l'existence d'une force globale que l'on peut par une commodité arbitraire décomposer en une force ascendante et une force de translation. De même les couleurs observées dans l'expérience du prisme n'ont aucun privilège. Le croire, comme c'est encore trop souvent le cas aujourd'hui, est une erreur grossière.

Le spectre coloré à la sortie du prisme n'est pas un attribut de la lumière mais une propriété physique révélée par le prisme. Celui ci ne trie pas selon une quelconque identité des composantes de la lumière à la frontière de deux milieux. Il CREE ces rayons lumineux « colorés » par diffusion lors du choc de la lumière avec les électrons des atomes accompagnée d'interférences multiples assurant la propagation rectiligne de la lumière dans diverses directions.

Rappelons que le bleu du ciel est aussi un effet de diffusion et que les couleurs des ailes de papillon proviennent d'effets d'interférence.

Le pêché originel est de croire que la lumière blanche* est composée de lumières colorées.

Ceci se comprend mieux encore en théorie quantique, où la lumière blanche, pas plus d'ailleurs que toute lumière ne contient matériellement des photons. La règle d'or de la mécanique quantique est que la quantification n'est pas un attribut actuel (variables cachées) mais une potentialité qui ne se manifeste qu'à l'observation, c.a.d. lors de l'interaction avec un milieu matériel. Le photon exprime une possibilité de la lumière (état) qui ne s'actualise que lorsque l'on introduit le prisme. C'était le sujet de la querelle entre Planck et Einstein. Jusqu'à présent la physique a donné raison à Planck.

Quant aux couleurs des objets observées dans la nature elle proviennent de l'absorption de la lumière due au comportement collectif des électrons selon les lois de la mécanique quantique.

Ainsi les plus grands principes de la physique montrent que les « lumières colorées » résultent de l'interaction de la lumière avec la matière et sont plutôt des propriétés révélées par la matière que des attributs propres à la lumière. Aussi ne faut il pas s'étonner de ce que

la couleur soit une « propriété révélée par le cerveau ». Il ne pourrait en être autrement. La couleur n'apparaît que lorsque l'on introduit le cerveau et la conscience.

Il faut bien avouer que tout ceci n'est pas toujours clair dans la tête de bien des physiciens, et que cette discussion est rarement menée jusqu'au bout dans les grands livres d'Optique. Il y a donc chez le physicien une zone d'ombre qui justifie inconsciemment et explique sans doute sa tolérance vis à vis des divagations des peintres et du public en général. En sait-il vraiment plus, malgré sa science ? Ce silence complice empêche de considérer l'optique physiologique comme une optique à part entière.

COULEUR COMPLEMENTAIRE

La notion de couleur complémentaire est une notion centrale de l'optique physiologique. Elle provient d'une particularité du système de vision humain.

Deux couleurs sont dites complémentaires* lorsque leur addition (superposition*) donne l'aspect de la lumière blanche (blanc artificiel) ou leur mélange* (soustractif) donne l'aspect du gris ou du noir.

La notion de couleur complémentaire structure le système chromatique de répartition des couleurs selon un cercle, le cercle chromatique, en plaçant les complémentaires aux extrémités d'un diamètre. L'importance de la notion de complémentarité vient de la « loi du contraste simultanée de Chevreul ».

Cette loi stipule que lorsque deux couleurs sont mises au voisinage l'une de l'autre, elles se trouvent modifiées par l'incorporation par chacune de la complémentaire de l'autre. Ce qui régit la loi ce sont des couples d'opposition que le cercle chromatique permet de repérer. La loi indique, étant données deux couleurs contigües, quelles sont les transformations que chacune va subir du fait de son voisinage avec l'autre. Cette loi est valable pour toutes les couleurs.

Outre ce privilège structural de la relation sur les termes qui la constituent, Chevreul appelle à distinguer la couleur en soi, isolée et abstraite, de la couleur en situation. Ce rôle du contexte en évoque beaucoup d'autres, qui jouent un même rôle épistémologique, comme c'est le cas en linguistique structurale* et dans le structuralisme*. Les couleurs forment un système*.

Le mérite de Chevreul est aussi d'avoir clairement distingué le contraste simultané du contraste successif, la synchronie de la diachronie.

La loi de Chevreul a joué un rôle important pour des générations d'artistes désireux d'affirmer l'autonomie interne de la couleur sur le choix conscient de celle-ci. Une attitude qui a contribué à la naissance de l'art abstrait. De la loi du contraste simultané au *Carré noir sur un fond blanc* de Malevitch.

Le Simultanéisme est un mouvement artistique développé conjointement par Sonia Delaunay et son mari Robert Delaunay . Il consiste à introduire le principe du contraste simultané de couleurs dans la peinture (Prismes électriques , 1914 , Musée National d'Art Moderne Paris) mais aussi dans le textile , la mode vestimentaire et dans la décoration. Ses premières *robes simultanées* apparaissent à cette même date, ainsi que les illustrations d'un livre de Blaise Cendrars : *Prose du Transsibérien et de la petite Jeanne de France*.

COULEUR PRIMAIRE

La structure même du système visuel entraîne l'existence de couleurs primaires dont l'addition ou le mélange pondérés permettent d'obtenir toutes les autres couleurs. Pour la synthèse additive, les couleurs primaires sont le rouge, le vert et le bleu dont l'addition en proportions égales donne du blanc ; pour la synthèse soustractive, il s'agit du magenta, du cyan et du jaune dont le mélange égal donne du noir

En synthèse additive on parle de système RGB (red, green, blue) et c'est ce qui est utilisé pour les différents écrans de télévision couleur et les capteurs des appareils photographiques numériques.

En synthèse soustractive, par mélange dans le système CMY(cyan, magenta, yellow), on obtient toutes les réalisations de la couleur en imprimerie et en peinture.

COULEUR (dans la théorie des particules élémentaires)

Caractéristique des quarks* et des gluons*. Nombre quantique* prenant trois valeurs, déterminant trois états possibles de chaque type de quark, et huit états possibles à deux couleurs pour chaque gluon.

COURANT**COURANT NEUTRE****COURBE**

La courbe est un concept géométrique correspondant à la notion intuitive de ligne dans l'espace. On la définit parfois comme un trait sans largeur ou la frontière d'une figure. On en donne comme exemple la droite, la ligne brisée, la circonférence....

En géométrie analytique* une courbe est définie comme un ensemble de points dont les coordonnées* vérifient une équation, dite équation analytique de la courbe. Les courbes algébriques dans le plan sont celles pour lesquelles l'équation est un polynôme à deux variables. Les autres courbes sont dites transcendantes.

COURBURE**COVARIANCE****CPT (Cf. Invariance CPT*)****CREATION et ANNIHILATION D'UNE PAIRE PARTICULE ET ANTIPARTICULE****CREATION****CREATION D'UNE PARTICULE****CREATION D'UNE QUASIPARTICULE****CREATIONNISME**

Le créationnisme est une vision du monde selon laquelle tout l'univers matériel qui nous entoure a été créé par un Créateur immatériel dans un passé plus ou moins lointain. Les créationnistes s'opposent aux partisans d'une théorie de l'évolution* selon lesquels le monde matériel est progressivement devenu plus complexe depuis un chaos originel jusqu'à aujourd'hui. Créationnistes et évolutionnistes s'opposent autour du second principe de la thermodynamique*. Pour les uns ce principe signifie que seul le désordre peut apparaître dans l'évolution d'un système fermé. Pour les autres ce principe ne s'applique pas car les systèmes biologiques sont ouverts*. Ils

s'opposent aussi sur le rôle du déterminisme ou du hasard, car pour les uns la complexité du monde vivant ne peut provenir que d'un « dessein intelligent* », alors que pour les autres le hasard* joue un rôle non négligeable. Les créationnistes arguent du fait qu'il n'y a pas de preuves véritables de la théorie de l'évolution. Hélas oui, mais certainement trois fois non. La théorie de l'évolution devient un monument de scientificité.

Si le débat se plaçait uniquement sur le terrain scientifique, les évolutionnistes auraient facilement raison de leurs adversaires. Mais il s'y mêle toutes sortes d'autres motivations : religieuses (à partir du récit de la Génèse), sectaires, idéologiques (mouvement anti-science*) ou politiques. Une polémique qui s'installe sur le terrain des rapports entre la science et la religion*.

Quant à la Torah juive elle ne peut être interprétée comme un discours véridique dicté par Dieu à Moïse. Elle est manifestement constituée de plusieurs documents d'époques différentes qui ont été réunis sans doute vers le VI^e siècle avant J-C. Le récit de la Génèse ressemble étonnement à un récit analogue trouvé dans des tablettes babyloniennes, et où Marduk se repose après avoir créé le monde.

CRISE DES FONDEMENTS DES MATHÉMATIQUES

Dans les années 1880 Cantor* a systématiquement exposé sa théorie des ensembles*, une théorie des ensembles abstraits. A la même époque se développait la logique mathématique*. Des travaux comme ceux de Frege « Les fondements de l'arithmétique » (1884) ou de Dedekind « Ce que sont les nombres et ce qu'ils devraient être » (1887), travaux qui comme ceux de Cantor sont caractérisés par une nouvelle méthode logique abstraite, utilisant directement des raisonnements logiques au lieu de calculs. Dedekind fut un des premiers à comprendre l'importance de la théorie de Cantor et à obtenu des résultats importants de cette théorie. En faisant usage de la théorie des ensembles, il expose une construction axiomatique des entiers naturels. Abstraction et axiomatisation sont les maîtres mots de ce nouvelles mathématiques.

Ces théories, venant s'ajouter à la découverte des géométries non euclidiennes*, ont encouragé de la part des mathématiciens un effort de reconstruction, ou plus exactement de réorganisation de leur discipline. Manquant de bases solides sur lesquelles elles pouvaient s'appuyer dans leur ensemble, les mathématiques apparaissaient comme une simple agglomération de théories dont il était difficile de distinguer un liant, commun à toutes ces notions mathématiques fort

éloignées, et parfois semblant divergentes. Axiomatique et définition devaient nouer les différentes branches mathématiques en un tout uni. À la géométrie, au calcul infinitésimal mais aussi à une théorie où la théorie des ensembles fonctions en plein développement, etc. manquaient les fondations d'une bâtisse. Au cours de l'élaboration de ce liant qui se révéla naître du développement des théories de la logique et des ensembles, un nombre conséquent d'obstacles à priori insurmontables se firent jour : la découverte d'antinomies* (paradoxes*). L'antynomie logique de Russel (1902) (paradoxe de Russel*), l'antynomie de Cantor (1899), l'antynomie sémantique de Richard (1906).

Au centre des problématiques nouvelles et donc d'avancées aussi denses, les paradoxes de la Crise des fondements n'allaient pourtant pas être tous résolus. Contre un grand nombre d'entre eux, l'esquive, voire la feinte de corps, se révéla presque la seule solution. Par le biais d'axiomes plus restrictifs, les mathématiques rendirent caduques les paradoxes qui leur semblaient insurmontables en considérant que les objets qui y avaient trait ne relevaient pas de leur domaine d'intérêt ni du domaine d'intérêt des mathématiques traditionnelles.

Les antinomies de la théorie des ensembles provoquèrent une crise dans les mathématiques, certains mathématiciens allant jusqu'à proposer l'abandon de la théorie des ensembles. Mais comme les antinomies ne touchaient pas directement les raisonnements et les démonstrations de l'analyse et de la géométrie où la théorie des ensembles apportait de nombreux résultats intéressants, la plupart des mathématiciens se solidarisèrent avec la fameuse déclaration de Hilbert* : « Personne ne peut nous chasser du paradis que Cantor a créé pour nous ». L'entreprise pour surmonter les antinomies a créé différents points de vue sur l'existence du concept d'ensemble et de nombre.

Les idées et les découvertes de Cantor rencontrèrent dès le début une forte résistance, en particulier de la part de Kronecker. Celui-ci défendait la mise au premier plan des grandeurs discrètes et des nombres naturels, à partir desquels on peut construire les nombres rationnels et irrationnels. « Dieu a créé les nombres entiers, tout le reste vient par la main de l'homme ». On ne soulignera jamais assez que tous ces travaux baignaient dans une atmosphère métaphysique. Cantor, sous la très forte influence de Spinoza*, considérait que les concepts mathématiques ont une réalité immanente. Les travaux de Cantor ont exercé une profonde influence sur les mathématiciens russes, adeptes de la « Glorification du nom », Lusin par exemple. Ils donnaient à la dénomination un sens profond, et ne pouvaient que souscrire à la

dénomination des ensembles infinis par la hiérarchie des aleph (Cf. Nombres cardinaux*) qui offraient une existence immanente (Cf Science et religion*).

Vers la fin du 20^e siècle surgit la question suivante : la possibilité d'une traduction dans le langage de la théorie des ensembles et de la logique est-elle véritablement la forme exclusive de justification et de rigueur en mathématiques ? Depuis Poincaré, il y a toujours eu des réfractaires aux approches standard des fondements des mathématiques. Poincaré défendait la thèse selon laquelle, formulée en termes modernes, les variétés de théories logiques formelles - qu'il concevait comme fortement reliées aux opérations ensemblistes - n'expriment pas la structure essentielle à une authentique compréhension des mathématiques. Une alternative possible serait que les mathématiques n'aient pas besoin de fondements, ce dont témoignerait le fait que l'existence de propositions formellement indécidables (dans un système arithmétique donné) ou les problèmes non résolus par les axiomes standard (en théorie des ensembles) n'ont pas empêché le développement d'une science viable et, en fait, puissante. En conséquence, c'est l'idée même de fondements des mathématiques qui pourrait être suspecte. Les mathématiques pourraient et devraient alors être comprises à partir de leur seule pratique.

CRISE DES SCIENCES

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle les sciences se sont développées sur la base de méthodes expérimentales manipulant des observables. Elles ont remportés des succès extraordinaires et se sont constituées sous leur forme moderne. A la fin du siècle les sciences se voient confrontées à une sorte de contradiction interne dont on peut penser qu'elle est justement un effet de leurs progrès spectaculaires. On voit se succéder des crises qui affectent les fondements même des sciences. En physique on assiste à l'effondrement de la physique newtonienne sous les coups conjugués de la théorie de la relativité* et de la mécanique quantique*. De même la mathématique et la logique subissent deux importantes crises : celle engendrée par la découverte de paradoxes logiques affectant la théorie des ensembles* et la crise des fondements* des mathématiques.

Ce sont des crises méthodologiques mettant en cause la méthode expérimentale qui avait si bien réussi dans les sciences. Ce qui est en crise c'est la conception selon laquelle c'est l'expérience au sens le plus large qui fournit le matériau de la connaissance. Et ceci parce que les

progrès théoriques des sciences confrontent les scientifiques à toute une profusion de nouveaux objets dont on ne sait même pas très bien si l'on a raison de les qualifier d'objets. La plaie des non observables* s'étend. Les concepts de force, d'énergie, de quantum* d'énergie en physique quantique, ne correspondent à aucun objet directement observable tout en étant postulés par la science physique qui se veut expérimentale. Une situation assumée depuis Leibniz* par la conception du symbolisme* de la physique, et défendue par Helmholtz* et Hertz*.

Les sciences se sont trop éloignées de l'expérience immédiate, de l'expérience des choses concrètes, et c'est cet éloignement qui provoque des crises. Refonder les sciences en les rattachant à l'expérience immédiate. C'est à une problématique centrale de la philosophie à cette époque. Pratiquement tous les grands courants philosophiques du XX^e siècle sont nés pour répondre à un besoin de fondation des sciences compris en ce sens.

Une position empiriste*, ou de manière plus restrictive positiviste*, a été défendue par Mach (Cf. Machisme*), puis reprise par de très nombreux philosophes en particulier au sein du Cercle de Vienne*. Ils espéraient montrer comment les entités abstraites de la science naissent à partir des complexes de sensations. Mais ils ont rencontré toutes sortes de difficultés. La position de Husserl* était également motivée par un projet de fondation des sciences, qui s'accordait d'ailleurs partiellement avec celui des positivistes. Il crée à cet effet la « phénoménologie transcendantale* » en opposant l'intentionnalité* à la représentation*. Le monde qui existe hors de moi est définitivement mis entre parenthèses, comme un monde transcendant*, mais il y a un monde qui apparaît en moi, le monde comme phénomène. La phénoménologie transcendantale se présente comme une science universelle fondée uniquement sur les vécus. La position de Husserl est originale mais fort complexe et ne fonde ni la psychologie ni la logique. On peut certainement la qualifier de métaphysique*. Elle nous dit que pour connaître le monde il faut d'abord se détourner du monde.

Bien que cette crise des sciences ait marqué son apogée entre 1890 et 1935, elle se continue jusqu'à aujourd'hui à travers toutes les problématiques de la physique quantique*, de la cosmologie* ou des sciences cognitives*.

CRISTAL

CRITIQUE DE LA SCIENCE

CRITIQUE (PHENOMENE)

CULTURE

Le terme de culture s'oppose à celui de nature*. du

CULTURE DU NON-LINEAIRE (Cf. Linéaire et non linéaire*)

Le développement de la théorie des systèmes dynamiques* et le néo-mécanisme* qui en découle sont à l'origine d'une vision du monde qui se cristallise en une véritable culture du non-linéaire. Une culture qui intègre profondément l'idée qu'une petite cause peut avoir un grand effet disproportionné et que l'effet peut rétroagir sur la cause. Ce couplage du non linéaire* et de la rétroaction* qui fait la spécificité des auto-oscillateurs* et leur universalité. Une vision très large de l'auto-organisation* et de la naissance des formes*, un sens approfondi de la notion d'autonomie*. Une attention profonde aux paramètres qui contrôlent le comportement des systèmes et dont la variation provoque des bifurcations* qui peuvent entraîner des régimes chaotiques*.

Il y'avait un univers de Fourier* qui triomphait avec l'électromagnétisme* et plus tard avec la mécanique quantique*. Celle-ci marque l'apogée de la culture linéaire.

L'infiltration du non linéaire dans la culture se produit lors d'un changement complet des systèmes de référence de la philosophie naturelle, la substitution à l'astronomie, de la biologie et de la dynamique sociale. Dans des civilisations où l'idée de Dieu était prégnante, les considérations sur la forme et la nature du Cosmos occupaient le devant de la scène. Le monde était organisé à l'image du ciel et naturellement régulé, ce qui explique le succès de la mécanique classique et l'emprise du mécanisme*. Dans un monde où le vivant s'impose comme un impératif de la pensée avec sa non linéarité fondamentale, ses amplifications et ses rétroactions, sa chaoticité même, les acquis du néomécanisme* pénètrent tous les aspects de la culture.

Ainsi la pensée écologique qui habille tant de discours contemporains repose sur une écologie mathématique toute préoccupée de problèmes de stabilité*, de modèles non linéaires d'évolution de populations, d'ondes non-linéaires*, de structures

dissipatives* et de catastrophes*. Les temps ont changés depuis que Niels Bohr proposait encore un modèle planétaire de l'atome.

La pensée contemporaine assimile lentement la notion d'auto-référence*, de récursivité* et ses avatars, autotélisme* et autosimilarité*. L'immense succès médiatique de la notion de fractal* à travers une imagerie polymorphe, contribue à rendre populaire l'idée du retournement sur soi même. L'idée du champ d'action créé par tout être qui rétroagit sur l'être lui-même (le champ propre* de la charge électrique en électrodynamique).

La pénétration de la culture dunon linéaire dans notre société s'effectue le long des applications de l'informatique qui sont le siège constant de simulations de systèmes dynamiques*.

Les sciences cognitives* subissent largement l'influence de la théorie des systèmes dynamiques.

CYBERCULTURE

Terme désignant une idéologie et une tendance culturelle se développant sous l'influence de la théorie de l'information*, de la cybernétique* et de l'informatique*. Trois domaines scientifiques et technologiques qui ont en commun une attitude face au réel privilégiant l'organisation* par rapport à la substance*, la structure* par rapport à l'aspect particulier des choses, la syntaxe par rapport à la sémantique.. Ce qui fait que l'ordinateur modélise indifféremment des phénomènes d'origine totalement disparate. Ce qui fait que l'on a pu crier à la disparition de l'humain. Ce que d'aucuns appellent le paradigme cybernétique.

La substitution d'une réalité virtuelle* au monde réel, condition du développement de la communication*, source de la globalisation mondiale. Tout comme la démonétisation de l'argent par le système bancaire avait permis le développement du capitalisme marchand. Exemples représentatifs des rapports entre « technologie et idéologie* ».

Un mouvement des esprits, amorcé par les développements de la logique mathématique* et les manifestations de l'art abstrait*, repris par la mécanique quantique* et codifié par la théorie de l'information* et la cybernétique*. Un univers dont la description fait de plus en plus appel à la notion d'information*, remplaçant comme acteur principal la matière* et l'énergie*. Un univers où exister c'est informer. Le grand physicien J.A. Wheeler* utilise une formule lapidaire : « it from bit ».

Il ne faut pas oublier qu'en Amérique comme en URSS, la naissance de la cybernétique est liée à de profonds facteurs socio-économiques, culturels et idéologiques de l'après guerre. La cybernétique naissante aux USA a dû s'allier à un mouvement d'idées, ou plutôt un véritable lobby à l'américaine, qui prétendait assurer la paix mondiale et la santé mentale généralisée au moyen d'un bizarre cocktail, fait de psychanalyse*, d'anthropologie culturelle, de physique de pointe et des idées nouvelles que la cybernétique apportait. En URSS, après avoir été décriée, la cybernétique a satisfait les ambitions dirigistes des autorités communistes.

CYBERESPACE

CYBERNETIQUE

Du grec kybernetike, art de conduire. Successivement, science de l'organisation de l'Eglise (Cybernetica), étude des moyens de gouvernement (Cybernétique. A.M. Ampère. 1834), études des régulateurs de machines (governors, du latin gubernator, issu du grec kyberneter -J. Maxwell . 1868), contrôle et communication dans l'animal et la machine (N. Wiener.1948). Un terme français sans succès pourrait être Gouvernatique.

La Cybernétique est une science carrefour qui veut être la théorie générale du contrôle des systèmes ouverts complexes. C'est une théorie abstraite des systèmes ouverts*, qui s'intéresse plus aux interactions entre un système et son environnement qu'au système lui-même et à sa structure, quitte à le représenter par un modèle fonctionnel. C'est une méthodologie de modélisation abstraite de systèmes réels. C'est une recherche systématique de simulacres* du réel.

Trois paradigmes se partagent notre vision du monde: la matière*, le mouvement et l'énergie*, l'information*. La Cybernétique substitue au paradigme de la matière sur lequel est fondé la Chimie, et au paradigme mouvement-énergie sur lequel est fondée la Physique, un paradigme multiforme: information*, complexité*, contrôle*.

S'élevant au dessus des pratiques technologiques du XXème siècle (transmission et traitement des signaux et de l'information, automatismes, servomécanismes, contrôle optimal), la Cybernétique s'érige en science par l'élaboration d'un corps doctrinal propre, obtenu souvent au détriment d'autres sciences ou par amalgame d'autres savoirs. Elle prétend être un lieu privilégié d'intégration des connaissances et se pose ou s'impose comme science phare, démarche englobante, idéologie et ontologie. Elle se constitue en vision du monde

à la mesure du contexte socio-historique et technoscientifique contemporain.

Elle tend à supplanter dans ce rôle, la Mécanique (qui revient en force) et la Thermodynamique (qui refléurit) en les récupérant; elle cherche à coiffer toutes les tentatives de constitution de vision globale ou de système scientifique qui se développent parallèlement: Théorie de l'Information*, Théorie Générale des Systèmes, Synergétique* et Théories de l'Auto-Organisation*, Théorie des Catastrophes*, Intelligence Artificielle et Reconnaissance des Formes.

Etat d'esprit, méthodologie, doctrine unificatrice, point de vue, la Cybernétique est une approche commune à de très nombreux domaines de la connaissance. Ainsi parle-t-on d'une cybernétique technique, d'une cybernétique économique, d'une cybernétique biologique, d'une cybernétique médicale, d'une cybernétique des processus cognitifs, d'une cybernétique quantique.

L'approche cybernétique privilégie les points de vue qualitatifs et globaux. Son activité de modélisation*, de simulation* et de simulacre* est fondamentale. Son objet fétiche est la Boîte Noire* et son concept le plus populaire la rétroaction* (feedback). Ce sont les éléments fondamentaux du modèle cybernétique*.

Elle vise à se constituer en une théorie générale de l'intelligence, de l'intelligibilité et du contrôle. Elle se développe souvent selon les indications que lui fournissent les progrès de la physiologie et de la psychologie.

La Cybernétique est la doctrine du "Comme si" au XXème siècle. Elle jette un voile sur une partie du réel* dans une démarche méthodologique et sans aucun à priori ontologique. Ceci faisant elle introduit des fictions* comme substitut du réel*, exemple flagrant du fictionnalisme*.

CYBERNETIQUE (Problèmes philosophiques et sociologiques)

L'après deuxième guerre mondiale a vu naître la doctrine de la cybernétique, reflet de l'activité scientifique et industrielle suscitée par la guerre et de la concrétisation d'une nouvelle stratégie face au monde qui s'opère par un glissement métaphysique des Choses aux Actions. La cybernétique n'est pas une science mais un état d'esprit et une méthodologie qui incarne un volontarisme commun à l'Amérique d'après guerre et à la Russie soviétique de la fin des années cinquante. Un état d'esprit qui se nuance selon les pays et les circonstances historiques, mais qui marque profondément la culture. Avec des enjeux qui dépassent le scientifique et le technique et qui placent

d'emblée lacybernétique sur le terrain de la philosophie et de l'idéologie. Un statut qui se trouve à la source de bien des polémiques et des disputes idéologiques.

Le terme cybernétique a été mis à la mode par l'ouvrage de Norbert Wiener : « *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine* » paru en 1948. La traduction russe date de 1958.

L'ouvrage de W. Ross Ashby : « *An introduction to cybernetics* » (1956), est traduit en russe en 1959 avec une préface du grand mathématicien A.N. Kolmogorov, qui déclare qu'il est maintenant trop tard pour polémiquer sur le bien fondé de l'emploi du mot cybernétique. Pour lui la cybernétique c'est l'étude des systèmes de nature quelconque susceptibles de recevoir, de conserver et de transformer de l'information pour l'utiliser à des fins de contrôle et de régulation. Ce mathématicien, fondateur de la théorie moderne des probabilités et qui va contribuer de manière éclatante aux développements de la théorie de l'information* et de la théorie des systèmes dynamiques*, souligne bien le rôle essentiel que joue le concept d'information propagé par la théorie de l'information nouvelle née (Shannon. 1948), dans les ambitions de la cybernétique. Il fait la revue des armes de cette théorie abstraite : une théorie statistique : « la théorie de l'information », une théorie logique : « la théorie des algorithmes* » et une théorie dynamique : « la théorie des automates* ». La cybernétique c'est l'alliance entre les probabilités, la logique et la dynamique. Vaste programme en effet. Mais l'insistance sur le rôle de la théorie de l'information révèle qu'il s'agit là d'autre chose que d'une théorie physique traditionnelle, car tout comme la probabilité, l'information n'est pas une grandeur physique comme une autre. De fait la cybernétique n'est pas une théorie physique spécifique mais une doctrine générale de modélisation de certains phénomènes dynamiques.

Cybernétique a une connotation forte de contrôle et d'optimisation, et peut être utilisé pour renvoyer à une science du contrôle optimal des systèmes dynamiques complexes . Mais si la cybernétique c'est le contrôle plus l'information, la théorie du contrôle devient en fait la construction de modèles de contrôle. Cette science implique un traitement de l'information (collecte, stockage, transmission), auquel il est préférable de réserver le terme restrictif d'Informatique. L'informatique est une technologie au service de la cybernétique. L'idéologie de la production et de la consommation privilégie l'aspect informatique, enraciné dans la technologie industrielle, et occulte l'idée cybernétique. Ce n'est pas par hasard si le

vocabulaire informatique domine dans les pays capitalistes et si le terme cybernétique était largement utilisé dans les pays socialistes.

La cybernétique s'inscrit dans l'ambition, répandue au XX^{ème} siècle, de constituer des sciences générales abstraites, ne spécifiant pas de domaines particuliers, ni d'objets effectivement constitutifs de la réalité physique. La cybernétique prétend étudier des modèles mathématiques abstraits d'objets réels. Le développement de la logique et de l'axiomatique mathématique sont les emblèmes de cet effort que l'on retrouve dans la linguistique générale, la sémiotique et le structuralisme. La cybernétique est la science qui étudie les principes abstraits de l'organisation et du fonctionnement des systèmes complexes. La cybernétique se veut en effet une théorie générale du contrôle, une théorie générale des systèmes, une théorie générale de la complexité. Une ambition partout présente dans l'Art du XX^{ème} siècle, dominé par les notions d'abstraction et de formalisation.

En fait pour la cybernétique, à la différence d'une grande partie de la physique, tous les systèmes sont ouverts* sur leur environnement, et l'on doit décrire à la fois le système physique et son environnement (éventuellement l'observateur). C'est là le dogme central de la cybernétique, où un système cherche à gagner une autonomie* dans une situation où il n'est pas isolé, mais utilise en feedback l'information sur son propre comportement et sur les modifications du milieu extérieur que ce comportement entraîne.

La cybernétique introduit le sens* en physique. La cybernétique est une sémiophysique*.

À défaut de phénomènes nouveaux, de théorèmes fondamentaux ou d'équation générale, la cybernétique a contribué à populariser certains concepts et à intégrer dans la culture des thématiques scientifiques qui paraissaient jusqu'alors très académiques.

Elle a sorti la logique moderne et les langages formels de leur isolement lorsqu'ils se cantonnaient à l'étude du fondement des mathématiques, à l'élucidation des mécanismes du raisonnement ou à l'axiomatisation des théories. Elle en a fait des outils puissants pour la manipulation des systèmes complexes, en particuliers les systèmes informatiques. Elle a popularisé la logique en la rendant opératoire dans des problèmes concrets de contrôle, où interviennent des concepts de calculabilité et d'algorithme. Ce faisant elle a contribué à façonner une nouvelle vision du monde où les systèmes sont définis par des relations abstraites, des dépendances fonctionnelles et des flux d'information, plutôt que par leur composition matérielle. Une vision à laquelle l'art abstrait a largement contribué jouant là un rôle pionnier tout à fait remarquable. Car, tout comme l'art abstrait, la

cybernétique s'intéresse aux propriétés des systèmes qui ne dépendent pas de leur composition matérielle concrète. Ceci permet de décrire avec les mêmes concepts des systèmes physiquement très différents, en établissant entre eux des isomorphismes abstraits, qui sont à la base même de l'activité principale de la cybernétique, une activité de modélisation et non pas de représentation du réel.

A la différence des mathématiques, la cybernétique est caractérisée par une démarche constructive. C'est une science de la modélisation, ce qui implique la calculabilité de tous les éléments du modèle mathématique. Ceci entraîne souvent l'emploi d'approximations avec discrétisation des variables, ce qui explique le succès des modélisations utilisant le concept d'automate fini.

En s'intéressant au comportement des systèmes et non pas à leur structure matérielle, la cybernétique développe des concepts relationnels pour l'étude des systèmes ouverts.

Le système cybernétique est un modèle abstrait de système ouvert, défini par :

les entrées

les sorties

l'état interne du système, qui permet de prévoir les sorties en fonction des entrées, grâce à

une fonctionnelle de sortie,

qui se modifie sous l'action des entrées (contrôle) selon une fonctionnelle de transition,

qui peut être déduit à partir des sorties (observabilité).

C'est là la fameuse « boîte noire* », l'automate mathématique, outil de base de la modélisation cybernétique. L'automate mathématique, abstraction d'un automate concret, est promu par la cybernétique au rang de modèle universel. Elle considère en particulier l'automate fini, comme la structure commune à tout système, qui opérant à des temps discrets, change d'état interne en recevant des signaux par un canal d'entrée et en émettant des signaux par un canal de sortie, états et signaux étant en nombres finis. La nature des états et des signaux est quelconque ; on peut les considérer comme des symboles (lettres) formant des alphabets : alphabet des états, alphabet des entrées, alphabet des sorties. La machine de Turing, les neurones formels ou les automates cellulaires sont des cas particuliers d'automates abstraits, souvent utilisés en réseaux. Ce concept de boîte noire marque bien le rapport historique et méthodologique que la cybernétique entretient avec le béhaviorisme psychologique et son avatar récent le fonctionnalisme. La cybernétique est une doctrine béhavioriste généralisée.

Dans les années 70, la vogue de l'étendard cybernétique s'estompe, et si le terme garde un certain emploi en U.R.S.S., c'est en tant qu'équivalent d'informatique. Effectivement la vague informatique ensevelit le cybernétique, en en rendant par ailleurs les motivations confuses. L'échec de la cybernétique est tout d'abord du à son incapacité à concrétiser l'utopie d'unité des savoirs qu'elle promouvait et qui explique son succès initial. Les perspectives d'une modélisation abstraite et donc universelle des systèmes dynamiques complexes ont été déçues par l'absence de méthodes concrètes de modélisation. Aucun traité de cybernétique n'a vu le jour, où l'on enseignerait les procédés de construction des boites noires, les voies de définition de l'état et les principes permettant de trouver la forme de l'équation d'évolution de l'état.

La cybernétique, contrairement à la physique théorique, n'a pas su formuler des équations ou des principes généraux liés à des considérations d'optimalité ou de symétrie. Et la notion fétiche de feedback s'avère très difficile à concrétiser sur le terrain. La spécificité des systèmes est très difficile à réduire.

De plus, la cybernétique subit la concurrence de disciplines, qui malgré leur esprit cybernétique, se développent indépendamment de la doctrine historique mère. C'est en particulier le cas pour la théorie des circuits électriques, outil de base de l'ingénieur électricien et électronicien. La construction des circuits équivalents se pratique avec des règles précises que les élèves ingénieurs apprennent à manipuler. Ce faisant ils construisent de véritables modèles cybernétiques. C'est là une pratique d'ingénieurs qui a inspiré la doctrine cybernétique sans pour autant la servir dans ses ambitions.

Historiquement la cybernétique s'est constituée à l'ombre de la théorie du contrôle automatique et lui est redevable de bien des concepts. Elles ont en commun la représentation du système par l'espace des états. Mais après la deuxième guerre mondiale l'automatique prend un essor autonome qui doit peu à la cybernétique et se fonde sur la formulation de principes optimaux (Bellman, Pontriaguine) et la théorie du signal.

Le programme cybernétique va par ailleurs se trouver supplanté par le développement dramatique de la théorie qualitative des systèmes dynamique non linéaires. Une théorie mathématique abstraite des systèmes d'équations différentielles issue de l'élargissement de la théorie générale des vibrations, et promouvant des concepts universels comme l'auto oscillation, l'auto organisation, les bifurcations et le chaos.

A l'ambition de décrire les systèmes dynamiques complexes par le modèle automate-information, en se focalisant sur le couple entrée-sortie, succède l'analyse qualitative du comportement dans l'espace de phase (espace des états), en se restreignant à l'étude des états asymptotiques. Une analyse qui ne récuse pas le programme cybernétique dont elle récupère les concepts clés d'entropie*, d'information* et de rétroaction*, mais qui le relègue du devant de la scène en l'accomplissant selon une démarche historique distincte. Avec la vogue d'un nouveau modèle universel, d'un nouvel outil de simulacre rendu opérationnel par l'ordinateur : l'automate cellulaire. Ce que S. Wolfram, non sans raison, appelle « A new kind of science », où l'ordinateur remplace l'analyse mathématique traditionnelle.

Pour comprendre comment la théorie des systèmes dynamiques non linéaires ravit la vedette à la cybernétique en satisfaisant à des ambitions analogues, il suffit de produire la liste (à la Prévert) des phénomènes où se manifeste la structure d'auto oscillateur*. Une liste inaugurée en 1928 par Van der Pol, le grand radioélectricien, et brillamment augmentée depuis : « une harpe éolienne, un marteau pneumatique, le bruit grincant d'un couteau sur une assiette, le flottement d'un drapeau au vent, le bruit bourdonnant que fait parfois un robinet d'eau, le grincement d'une porte, le multivibrateur d'Abraham et Bloch, le tétrode multivibrateur, les étincelles périodiques produites par une machine de Wimshurst, l'interrupteur de Wehnelt, la décharge intermittente d'un condensateur à travers un tube au néon, la manifestation périodique d'épidémies et de crises économiques, la densité périodique d'un nombre pair d'espèces d'animaux vivant ensemble et dont une des espèces sert de nourriture à l'autre, le sommeil des fleurs, la manifestation périodique d'averses derrière une dépression, les frissons de froid, la menstruation, les battements cardiaques.....les horloges, les émetteurs radio et de télévision, le maser et le laser, de nombreuses réactions chimiques oscillantes, l'émission périodique des hormones, certaines étoiles variables comme les céphéides, le violon et la clarinette... »

Tous ces systèmes produisent des phénomènes périodiques à partir de sources d'énergie sans périodicité, par l'effet de la dissipation et de la rétroaction. De l'ordre à partie d'un désordre bien contrôlé. La nature est un violon. Une vision unitaire à faire pâlir d'envie la cybernétique.

N'ayant pas réussi à s'imposer sur le plan des résultats la cybernétique a cependant vu son idéologie de la modélisation devenir une des composantes essentielles de la pensée contemporaine. Au point qu'un auteur comme C. Lafontaine a pu parler de la constitution d'un

« empire cybernétique ». Cette empreinte idéologique sur la culture provient de ce que « Matrice de la techno science, la cybernétique correspond dans les faits à un projet de connaissance axé sur le contrôle opérationnel plutôt que sur la recherche fondamentale destinée à mieux comprendre un phénomène donné ». La cybernétique, en concrétisant un besoin de représentation du réel aux prises avec les difficultés de l'objet « en soi » a fini par s'identifier à toutes les tentatives d'escamotage du sujet au profit d'un champ de relations. Devenant ainsi une des positions fortes de l'épistémologie contemporaine à travers des courants comme le constructivisme* ou le réalisme structural*.

CYBERNETIQUE ET STRUCTURALISME

La cybernétique a donné corps et statut à une démarche épistémologique générale dont les manifestations ont bien souvent précédé la formulation cybernétique. Il s'agit d'une démarche de modélisation du réel qui privilégie les relations entre les objets au dépens de leurs propriétés intrinsèques, les propriétés* au dépens des attributs*, les qualités secondaires* au dépens des qualités premières*, les causes formelles* au dépens des causes efficientes*.

C'est là le sens profond de toute description par entrées-sorties d'une boîte noire*, qui met l'objet ontologiquement entre parenthèses, le dépouille de toutes ses qualités et l'habille de ses relations avec le monde qui l'entoure.

C'est précisément la démarche adoptée par la mécanique quantique* vis à vis du monde microphysique. C'est aussi la démarche de la mathématique* et de la logique* modernes où l'on ne soucie pas de ce que représentent les symboles* et où l'on construit une syntaxe* pure fondée sur les relations. Logique et mathématique utilisent des formalismes à caractère ensembliste, employant les notions d'ensemble, de sous ensemble, d'appartenance et les notions dérivées. C'est par la définition de relations entre éléments, entre sous ensembles (lois internes et externes) que le discours mathématique s'enchaîne. La donnée de telles relations définit ce que l'on a coutume d'appeler une structure, c.a.d un type de rapport entre les parties et le tout.

Ce problème de la relation entre les parties et le tout est traditionnel en philosophie naturelle, où l'on suppose que le tout est organisé et que les parties sont organiquement connectées par des relations. Le structuralisme est une attitude d'analyse du tout en terme de structure dans des circonstances où la plupart du temps le tout n'est pas la simple somme des parties. Le tout existe alors jusque dans les

parties si bien que la reconstitution du tout à partir des parties est une procédure non linéaire. Les parties n'existent qu'en fonction du tout, ce qui est le contre-pied absolu de l'atomisme.

Le structuralisme porte toute son attention sur le réseau des relations (la structure) qui est la raison constituante de l'existence du tout. Le tout est alors souvent désigné par le terme système, et l'on dit que le structuralisme en faisant du système la seule réalité est un type de philosophie systémique.

On voit que la structure d'un système est un ensemble de relations entre les sous systèmes qui fonde l'existence du système en tant que tel. On peut pour une même situation naturelle définir différentes structures selon la décomposition en sous systèmes considérée. La structure est donc une forme relationnelle émergente réalisant un hylémorphisme de type aristotélicien. La structure n'a pas la même réalité empirique que la substance car elle ne s'exprime pas directement mais à travers les modèles construits pour représenter la réalité. Malgré la tentation de voir dans la structure l'essence du tout, la structure relève plutôt d'une démarche de modélisation car elle n'apparaît que dans l'adoption d'un point de vue particulier sur le système.

On voit donc que la pratique des savoirs comporte souvent l'adoption d'une démarche structuraliste qui va précisément se retrouver au cœur de la cybernétique. Le structuralisme du XX ème siècle a en commun avec la cybernétique son caractère relationnel et sa méthodologie de modélisation abstraite.

Historiquement ce structuralisme prend naissance au début du siècle avec l'œuvre du linguiste Ferdinand de Saussure. De fait Roman Jakobson, un linguiste qui a joué un rôle charnière fondamental, a qualifié de structuralisme les trois affirmations (cybernétiques) de Saussure sur le langage :

la nature systémique du langage, le tout y étant plus que la somme des parties,

la conception relationnelle des éléments du langage, où les entités linguistiques sont définies par des relations de combinaison ou d'opposition les unes aux autres,

la nature arbitraire des éléments linguistiques qui sont définis d'après la fonction ou le but qu'ils remplissent plutôt qu'en terme de leurs qualités inhérentes.

Un des faits les plus marquants de l'histoire intellectuelle du XX ème siècle est dans la convergence entre la linguistique et la cybernétique et la reconnaissance du statut des méthodes de modélisation abstraite. Ainsi la linguistique voit naître chez Saussure,

puis Jakobson, une discipline dite linguistique structurale, qui étudie les modèles formels des langues naturelles et la méthodologie de construction de ces modèles. Présente au début à l'état implicite, la notion de modèle en linguistique prendra corps sous l'influence de la cybernétique. C'est cette méthodologie modélisatrice, qui en s'étendant à un vaste domaine des sciences humaines sous l'influence de la linguistique, va constituer après 1945 le mouvement historique dénommé Structuralisme*.

Cette collusion entre la linguistique structurale et la cybernétique apparaît clairement dans le fait historique du développement de la linguistique structurale en URSS précisément à partir du moment où en 1955 les objections idéologiques contre la cybernétique ont été levées. Cela a été marqué par la mise en chantier de recherches sur la traduction automatique associant linguistes et mathématiciens. C'est par cette voie que le structuralisme fera son entrée dans la linguistique soviétique. Le terme 'modélisation' y revient sans cesse en mentionnant explicitement son emprunt à la cybernétique.

M. Aucouturier commente ainsi cette pratique de la modélisation (Le formalisme russe) :

« Quant à la notion de 'modèle', empruntée à la cybernétique, elle désigne toute construction autonome imitant artificiellement une réalité donnée et servant à en connaître la structure et le fonctionnement. En ce sens, tout langage représente une certaine 'modélisation' du réel qu'il découpe en unités lexicales et structure selon les rapports exprimés par ses propres règles grammaticales et syntaxiques. Comme le langage, la littérature avec ses formes, qui sont toujours chargées de signification, nous propose une certaine 'modélisation' du réel, et chaque oeuvre constitue un énoncé reposant sur cette modélisation et la modifiant. Elle est selon Lotman un 'système modélisant secondaire' superposé à celui que constitue le langage. »

Cet emploi de la conception de modèle en linguistique est aussi caractéristique de la linguistique structurale américaine en particulier dans l'oeuvre de Noam Chomsky.

A travers la linguistique la cybernétique va aussi exercer son influence sur la sémiotique.

La sémiotique est la science des signes et des systèmes de signes. Les impulsions initiales ont été données à la sémiotique par les travaux du philosophe américain Charles Peirce (1839-1914) et du philologue et anthropologue suisse Ferdinand de Saussure (1857-1913) qui ont étudié la nature du signe et du langage, donnant naissance à l'idée

d'une discipline unique étudiant tous les systèmes de signes. La sémiotique contemporaine s'est constituée en science indépendante dans les années cinquante aux frontières de la linguistique structurale, de la cybernétique et de la théorie de l'information. Elle avait été préparée par les travaux des formalistes russes, l'analyse structurale des contes par Vladimir Propp et l'oeuvre du danois Hjelmslev. Tout comme la linguistique structurale, la sémiotique utilise une définition du signe comme élément d'un système. C'est cette réalité du système qui caractérise l'approche structuraliste ; le signe ne prend un sens que par ses rapports avec les autres signes et n'a aucun sens par lui-même. La sémiotique joue un rôle central dans le Structuralisme, au point que les deux démarches sont bien souvent confondues. A partir des années cinquante, l'idéologie structuraliste dans ses multiples applications sémiotiques rencontre la cybernétique, avec en commun le déplacement d'intérêt de l'objet vers les relations.

On peut distinguer trois groupes de travaux sémiotiques selon la tradition et le courant dans lequel ils s'insèrent. Ces écoles se différencient nettement selon les pays :

a) dans les pays de culture anglo-saxonne, les Etats Unis en particulier, la sémiotique se place sous l'influence de G.S. Peirce. Elle cherche à développer une théorie générale des signes et des faits de communication, avec un caractère philosophique nettement marqué. Chez Ch. Morris s'élabore une conception béhavioriste du signe et la sémiotique se veut surtout une étude du comportement symbolique.

b) en URSS c'est la théorie de l'information et la cybernétique qui influencent les sémioticiens, que ce soit dans l'école de Moscou (V.V. Ivanov, V.N. Toporov, I.I. Revzin et de nombreux mathématiciens et cybernéticiens intéressés par la linguistique comme A.N. Kolmogorov, A.A. Lyapounov, A.L. Dobrushin et B.A. Ouspensky) ou dans l'école de Tartu (I. Lotman). L'apport original de la sémiotique soviétique se trouve dans le domaine de l'étude des signes supralinguistiques et le développement d'une sémiotique de la culture.

c) en France domine la tradition linguistique saussurienne qui en fait s'identifie plus ou moins au mouvement structuraliste. Elle s'inspire largement de travaux de Claude Lévi-Strauss sur les systèmes de parenté et s'intéresse à la littérature, aux mythes, à la mode... Les travaux les plus marquants sont ceux d'A. Greimas et de R. Barthes.

C'est l'application de la démarche structuraliste en anthropologie avec l'oeuvre de Claude Lévi Strauss (*Les structures élémentaires de la parenté*. 1949) qui va déclencher, essentiellement en France, un mouvement scientifique et philosophique d'une certaine ampleur : le Structuralisme. Un courant d'idées qui semblait renouveler tout le

champ de vision des sciences humaines, en accord avec les notions de structures sociales du marxisme et les affirmations de la psychanalyse sur le caractère inconscient des motivations humaines profondes. Un large mouvement philosophique d'une grande vigueur intellectuelle et avec un certain rayonnement international, bien qu'il ait été quelquefois qualifié de toquade née de l'intellectualisme effréné des Français ou qu'il soit rabaissé au rang de simple incident dans une querelle de chapelle parisienne contre l'existentialisme, le marxisme ou la psychanalyse.

Malgré les affirmations initiales contraires de Lévi-Strauss qui évite de confondre la réalité et son expression mathématique, le public va se laisser abuser par l'idée d'une ontologie de la structure qui sous tendrait l'ensemble des activités humaines. Une erreur d'appréciation venant de la non mise en perspective, tout au moins en France à la différence de l'URSS, du structuralisme et de la cybernétique, permettant de comprendre le rôle et la nature de la modélisation. Le succès du structuralisme s'accompagne souvent d'une mauvaise compréhension de l'épistémologie des modèles. C'est là sans doute aussi la raison de bien des erreurs d'appréciation de la véritable nature de la cybernétique. La confusion entre structure-modèle et structure-essence.

Chassez l'ontologique il revient au galop. On n'arrive pas à se résoudre à ce qu'un modèle, si utile soit il, ne soit pas une théorie, mais un simple simulacre. Lévi-Strauss lui même s'est orienté toujours davantage vers un naturalisme ou un réalisme de la structure, c.a.d. vers un structuralisme ontologique et non plus seulement méthodologique. Le structuralisme ne ferait que redécouvrir les lois de la nature, la structure étant en définitive inscrite dans le biologique, comme le prétendent aujourd'hui certains généticiens.

Et pourtant au départ, la révolution lévi-straussienne consiste à débiologiser le phénomène universel de prohibition de l'inceste, interdiction universelle des relations sexuelles entre certains individus apparentés, à le sortir à la fois du schéma simple de la consanguinité et de considérations morales ethnocentriques. En considérant que la parenté est fondée sur l'alliance et que le mariage est une forme d'échange, Lévi-Strauss relie l'aspect négatif de la prohibition de l'inceste à l'aspect positif de l'échange matrimonial. L'hypothèse structuraliste opère là un déplacement de l'objet pour lui restituer pleinement son caractère de transaction et de communication qui s'instaure avec l'alliance matrimoniale. Elle voit là la règle fondamentale qui articule le passage de la nature à la culture, de la parenté donnée biologique à l'union qui relève de la décision et du

rapport à autrui. La prohibition de l'inceste n'est donc pas une loi biologique de la nature humaine mais la règle qui permet la gestion des femmes de la communauté en obligeant la femme à quitter son milieu naturel de naissance pour prendre un époux dans un milieu culturel composé d'étrangers à sa propre famille.

Lévi-Strauss sort donc d'une analyse en termes de filiation, de consanguinité, pour montrer que l'union des sexes est l'objet d'une transaction prise en charge par la société, qu'elle est un fait social et culturel. La prohibition n'est plus perçue comme fait purement négatif, mais au contraire comme fait positif créateur du social. Quant au système de parenté, il s'analyse comme relevant d'un système arbitraire de représentation, à la manière de l'arbitraire du signe saussurien.

Pour bien marquer le caractère de sa démarche Lévi Strauss requiert les services des mathématiques structurales du groupe Bourbaki, grâce à une rencontre avec le mathématicien André Weil, qui écrit l'appendice mathématique du livre. Ce qui confirme le sens de la méthode employée qui procède au déplacement de l'attention aux termes des relations à la prévalence accordée aux relations elles mêmes entre ces termes, indépendamment de leur contenu. La formalisation mathématique du travail de Lévi-Strauss ayant donné lieu à certaines critiques, une reformulation rigoureuse axiomatisée en a été faite en 1955 par le jeune mathématicien Philippe Courrège.

Le caractère cybernétique du structuralisme apparaît clairement dans ce texte de Lévi-Strauss republié en 1958 dans son recueil intitulé 'Anthropologie structurale' et où il insiste sur la notion de modèle (p.305):

« Le principe fondamental est que la notion de structure sociale ne se rapporte pas à la réalité empirique, mais aux modèles construits d'après celle-ci. Ainsi apparaît la différence entre deux notions si voisines qu'on les a souvent confondues je veux dire celle de structure sociale et celle de relations sociales. Les relations sociales sont la matière employée pour la construction des modèles qui rendent manifeste la structure sociale elle même.....

Il s'agit alors de savoir en quoi consistent ces modèles qui sont l'objet propre des analyses structurales. Le problème ne relève pas de l'ethnologie mais de l'épistémologie, car les définitions suivantes n'empruntent rien à la matière première de nos travaux. Nous pensons en effet que pour mériter le nom de structure, des modèles doivent exclusivement satisfaire à quatre conditions.

En premier lieu une structure offre un caractère de système. Elle consiste en éléments tels qu'une modification quelconque de l'un d'eux entraîne une modification de tous les autres.

En second lieu tout modèle appartient à un groupe de transformations dont chacune correspond à un modèle de même famille, si bien que l'ensemble de ces transformations constitue un groupe de modèles.

Troisièmement les propriétés indiquées ci-dessus permettent de prévoir de quelle façon réagira le modèle, en cas de modification d'un de ses éléments.

Enfin, le modèle doit être construit de telle façon que son fonctionnement puisse rendre compte de tous les faits observés ».

Cybernétique et structuralisme poursuivent les mêmes buts : désontologisation et modélisation du comportement. On a même pu dire que sans la poussée scientifique de la cybernétique, le structuralisme n'aurait jamais eu le retentissement qu'on lui connaît. Et ce malgré une mauvaise perception qui dure jusqu'à nos jours, de la nature véritable de la cybernétique qui en fait une démarche épistémologique et non pas une discipline

CYCLE LIMITE

DALEMBERTIEN

Opérateur différentiel linéaire agissant sur une fonction de n variables et du temps, égal à la différence du laplacien et de la dérivée partielle seconde par rapport au temps. Il permet d'exprimer de façon compacte l'équation d'onde en écrivant que son action est égale à zéro.

DE BROGLIE (ONDE DE)

Onde classique associée par la théorie quantique à toute particule microphysique et à tout objet quantique en général. Sa longueur d'onde est égale à la constante de Planck divisée par le produit de la masse par la vitesse. L'hypothèse de l'onde de de Broglie se justifie par l'apparition de phénomènes d'interférence* et de diffraction* pour les objets quantiques, leur donnant par là même un caractère particulier. On n'a jamais observé l'onde de de Broglie directement.

Dans la théorie de l'onde pilote* de Broglie a essayé sans succès d'attacher une particule à une onde non linéaire*.

Les travaux de Schrödinger ont remplacé l'onde réelle de de Broglie par une onde complexe, la fonction d'onde*

En fait l'onde de de Broglie permet d'affirmer que l'objet quantique n'est pas un objet classique localisé, mais un objet présentant le dualisme onde-corpuscule*. Cette onde mathématique est au cœur de la théorie quantique, car en discréditant la notion de trajectoire elle ouvre la voie à l'apparition des corrélations quantiques* responsables de l'existence de la matière et sources des phénomènes de magie quantique*. Elle lève véritablement un coin du voile comme l'écrivait Einstein à Langevin.

DECIDABILITE

La décidabilité est une des propriétés des systèmes formels*. Un système est décidable si et seulement si il existe un procédé effectif pour déterminer si une formule quelconque est ou n'est pas un théorème*. La notion de procédé effectif est liée à la notion de récursivité*. Seuls des systèmes assez pauvres sont décidables. Le théorème d'incomplétude de Gödel* établit l'indécidabilité de systèmes assez riches.

DECISION STATISTIQUE

DECOHERENCE

Circonstances qui empêchent de décrire un système microphysique par le libre jeu de l'interférence des états*, par suite d'une modification de l'information, lui faisant perdre son caractère quantique. C'est le cas par exemple lors d'une mesure* ou de l'effet du milieu environnant. C'est une des explications possibles de la transition d'une description quantique à une description classique dans la conception dualiste* de Copenhague, qu'il ne faut pas confondre avec une transition physique du quantique au classique.

Celle-ci semble pourtant se manifester lors de l'apparition dans le calcul d'une dissymétrie de la molécule d'ammoniac sous l'influence d'une molécule d'ammoniac voisine ou de la manifestation expérimentale et théorique de la disparition de la figure d'interférence lorsque l'on cherche à préciser par quel trou est passé l'électron dans l'expérience des trous d'Young.

Le quantique est fragile et semble ne se maintenir que dans les systèmes isolés. La décohérence bat en brèche le caractère émergent* de l'apparition du classique à partir du quantique.

DECOMPOSITION SPECTRALE (Cf , SPECTRALE*)

DECONSTRUCTION

Le terme de déconstruction a été proposé par le philosophe J. Derrida*, pour devenir comme la devise de l'attitude postmoderniste*. Attitude d'opposition à Descartes*, Kant*, Les Lumières* et le Rationalisme*. Attitude d'une époque, la nôtre, qui croît de moins en moins à la vérité de la Science et cultive un certain anarchisme épistémologique prôné par P. Feyerabend*.

La déconstruction est un examen critique du langage ayant pour effet de déstabiliser l'idée que les mots et les signes peuvent "s'emparer" de la présence du monde. C'est tout le contraire de l'attitude de la philosophie analytique*. C'est une tentative de subversion de l'objectivité* et du réalisme*, ainsi que des théories de la vérité* par correspondance entre le langage et le monde. Les fondements de la connaissance ne sont pas assurés, car les mots ne correspondent pas exactement au monde.

En particulier il faut dépasser les oppositions et les dualités rigides qui figent les concepts en les isolants, au lieu de laisser paraître les traces mutuelles qu'ils contiennent.

On peut dire en un sens que les points de vue de N. Bohr* ont été autant de déconstructions des fondements classiques de la physique. Quant au "monisme* onde-corpuscule" il est une déconstruction du concept d'onde et du concept de corpuscule en microphysique.

DECONVOLUTION

DECOUVERTE

La découverte est la mise en évidence d'un fait de la nature.

Galilée* et Newton* ont découvert les lois de la mécanique*. Young* et Fresnel* ont découvert la signification des phénomènes d'interférence* de l'optique. Becquerel a découvert la radioactivité*. Marie Curie a découvert le radium. Watson et Crick ont découvert la structure en double hélice de l'ADN*, Penzias et Wilson ont découvert le rayonnement résiduel*.

Mais la découverte entretient avec l'invention* des rapports étroits. On peut découvrir par hasard, mais c'est bien souvent le résultat d'une recherche où l'invention joue un rôle dominant.

On a inventé les atomes* bien avant de les découvrir. Les grandes lois de la physique sont bien souvent inventées avant d'être

découvertes par leur accord avec les faits expérimentaux. L'équation de Schrödinger a été inventée avant d'être découverte.

La découverte confronte le rationalisme* et l'empirisme*.

DEDUCTION

DEGRE DE LIBERTE

DEFINITION

DEFINISSABILITE

C'est la qualité éventuelle d'un terme ou expression d'une langue donnée de pouvoir être défini de l'intérieur de la langue elle-même. C'est une qualité peu probable en l'absence de termes primitifs non définis dans le système formel qui servent à définir les autres. Ainsi la théorie axiomatique des ensembles* contient deux termes primitifs, le symbole de la relation d'appartenance et l'ensemble vide.

DEFINISSABILITE (NON) (THEOREME DE NON DEFINISSABILITE DE LA VERITE DE TARSKI)

DEMON DE MAXWELL

DEMON DE LAPLACE

DENOTATION

DEPLACEMENTS POSSIBLES (DEPLACEMENTS VIRTUELS)

Déplacements élémentaires infiniment petits que peuvent effectuer les points d'un système matériel à partir des positions qu'ils occupent à un instant donné sans rompre les liaisons* imposées. Les déplacements possibles sont un concept purement géométrique ne dépendant pas des forces agissantes. Ils expriment la situation créée par l'existence des liaisons.

Ils sont utilisés pour la définition des conditions d'équilibre et des équations du mouvement, dans le principe des travaux virtuels de d'Alembert- Lagrange, qui est un des principes variationnels de la mécanique

DERIVEE

La dérivée d'une fonction* d'une variable est la fonction qui représente son accroissement infiniment petit au voisinage de chaque

point. C'est la vitesse de variation de la fonction lors de la variation de la variable. C'est la pente (inclinaison sur l'axe de la variable) de la tangente à la courbe correspondant à la fonction en chaque point du plan. C'est le concept fondamental du calcul différentiel*.

La dérivée d'une fonction simple est une fonction simple. La dérivée d'une fonction constante est égale à zéro. La dérivée d'une droite est une constante égale à sa pente.

La dérivée partielle d'une fonction de plusieurs variables est une dérivée par rapport à une variable lorsque les autres variables restent constantes.

DESCRIPTION

DESORDRE

Opposé à l'ordre*, comme existence d'une relation entre éléments d'un ensemble, le désordre est dans l'équivalence des éléments. Aucun élément n'a un rôle différent des autres. L'homogénéisation est la marque du désordre absolu.

En fait le concept de désordre évoque de nombreuses situations où se manifestent l'agitation, la dispersion, la turbulence, l'irrégularité, l'instabilité, le hasard, le bruit, l'altération de l'organisation. En fait toujours un concept à connotation négative comme le souligne les usages communs de chahut, chambardement, confusion, dérangement, désarroi, embrouillement, enchevêtrement, éparpillement, fouillis, gâchis, incohérence, pagaille, pêle mêle, qui sont tous des traits du désordre. Le désordre apparaît ainsi, tout comme la complexité*, une conception si générale qu'elle en finit par être vague et nécessite une définition précise, voire une mesure quantitative.

Dans une vision du monde dominée par la notion d'ordre, le désordre apparaît d'abord comme une dégradation. C'est précisément ce que formule le second principe de la thermodynamique* au moyen de la notion d'entropie*. Il formule la dégradation du pouvoir de produire du travail lorsque le travail se transforme en chaleur. Cette dégradation est mesurée par une croissance de l'entropie qui est une mesure du désordre moléculaire.

Vers la fin du XIX^{ème} siècle ont commencé à apparaître des signes d'un rôle positif du désordre. Cela n'a pas été sans étonner les ingénieurs d'apprendre à la suite des travaux de Wichnegradsky* que le frottement est essentiel à la stabilité des dispositifs de régulation et non pas une gêne qu'il faut éliminer. La thermodynamique s'intéressait surtout aux états d'équilibre et Einstein* eu l'audace de

montrer tout ce que l'on pouvait tirer de l'étude des fluctuations : l'existence des atomes par l'étude du mouvement brownien*, la structure corpusculaire de la lumière par l'étude des fluctuations du rayonnement du corps noir*. Il ouvrait ainsi la voie à l'étude des processus aléatoires* qui vont occuper bien des domaines de la physique et se trouver les héros de la théorie de l'information* et de la théorie du signal*. Enfin quelle ne fut pas la surprise lorsqu'à la recherche de la stabilité structurelle* des systèmes dynamiques on rencontra le chaos* déterministe trouvant ainsi que du désordre peut stabiliser l'ordre. Et que dire du rôle joué aujourd'hui par les systèmes dissipatifs* avec leurs attracteurs* et leur autoorganisation* montrant l'intervention du désordre dans la production d'un certain ordre. Le vivant n'existerait pas sans les phénomènes de désordre qui l'accompagnent.

Sans frottement au sol la marche n'existerait pas et les voitures ne rouleraient pas. Sans risque il n'y a pas d'entreprise ou d'action.

On peut regretter cependant qu'il ne se soit pas encore constitué une culture du désordre positif dans les visions communes du monde et dans les différentes philosophies qui règlent l'action des hommes. L'ordre est assimilé à la rigidité et la souplesse que procure le désordre est ignorée. L'ordre a besoin du désordre pour exister et se maintenir.

Les phénomènes de désordre sont ceux que la physique classique attribue au hasard et associe à une imprévisibilité à laquelle seul le calcul des probabilités permet de faire face. L'interprétation probabiliste de la mécanique quantique est imposée par des phénomènes microscopiques observables à caractère aléatoire. Les propriétés d'ordre et de désordre s'imbriquent. Qui n'a pas admiré l'organisation des tourbillons dans l'eau impétueuse d'un torrent ? L'ordre peut s'installer au sein de la turbulence. Tout se passe comme si la mécanique quantique exprimait les figures d'ordre d'un désordre microphysique.

DESSEIN INTELLIGENT

DETECTEUR

Appareil de mesure de la physique des particules* qui transforme en données macroscopiques les signaux émis par les particules lors de leurs interactions avec la matière. La détection des particules est un moment constituant de leur identité même. La

mesure* en mécanique quantique s'effectue au moyen de détecteurs. C'est la détection du photon* grâce à l'effet photoélectrique* qui en matérialise l'existence. Ce sont les traces dans les chambres à bulles* qui révèlent l'existence des particules élémentaires.

DETERMINATION CATEGORIQUE

DETERMINISME

Propriété d'un système physique qui manifeste une causalité* forte: à une cause donnée correspond un effet unique. C'est le cas pour les systèmes dont l'état* évolue selon une loi déterminée, comme en mécanique classique d'une manière générale. Une évolution unique lorsque les mêmes conditions sont spécifiées. Une classe d'équations différentielles d'évolution telles que la connaissance de l'état à un instant donné détermine l'état à un instant futur. Comme l'a déclaré Laplace* : « Nous devons donc envisager l'état présent de l'Univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre ».

Ce modèle de comportement est opposé au modèle de comportement stochastique* où des éléments aléatoires* interviennent dans la définition de l'état futur.

Les trajectoires ne se coupent pas dans l'espace des états*. C'est le cas en mécanique quantique lorsque la fonction d'onde*, en l'absence d'observation, évolue selon l'équation de Schrödinger*. Indéterminisme* s'oppose à déterminisme, mais le déterminisme ne s'oppose pas au hasard*. Le chaos déterministe* est un comportement aléatoire* de systèmes déterministes. Bien qu'elle soit une théorie de systèmes physiques où le hasard est irréductible, la mécanique quantique n'a pas de ce fait nécessairement le statut de théorie indéterministe.

DETERMINISME ET ALEATOIRE DANS L'EVOLUTION

DIAGRAMME

Un diagramme est une représentation visuelle simplifiée et structurée des concepts, des idées, des constructions, des relations, des données statistiques, de l'anatomie etc. employé dans tous les aspects des activités humaines pour visualiser et clarifier l'exposé du sujet.. C'est un schéma visuel simplifiant la représentation d'un système conceptuel ou matériel. Un diagramme permet aussi de décrire des phénomènes, de mettre en évidence des corrélations en certains facteurs ou de représenter des parties d'un ensemble.

Parmi les diagrammes les plus célèbres citons les diagramme de Venn en mathématiques qui permettent de représenter les opérations ensemblistes fondamentales et les diagrammes de Feynman* en physique condensant l'information contenue dans les termes d'une série de la théorie des perturbations.

DIAGRAMME DE FEYNMAN

Quoique la théorie quantique des champs* considère typiquement des objets quantiques* on peut donner des processus d'interaction et de transformation des particules une représentation graphique suggestive. Ces graphiques ont d'abord été introduits par R. Feynmann* et portent le nom de diagrammes de Feynmann. Ils ressemblent de l'extérieur à une représentation de trajectoires du mouvement de toutes les particules participant aux interactions, comme si* ces particules étaient classiques.

La méthode graphique de représentation des processus est étroitement liée à la méthode de la théorie des perturbations*. Cette méthode apparaît en théorie quantique des champs lors de la prise en compte mathématique par étapes d'actes d'interaction de plus en plus nombreux.. La succession de tels actes élémentaires correspond à différents processus physiques que l'on peut associer conceptuellement aux termes mathématiques. Là encore il ne s'agit pas d'une description de processus physiques réels mais d'une comptabilité formelle. C'est pourquoi les particules qui naissent et sont ensuite absorbées aux étapes intermédiaires dans cette succession de termes mathématiques sont dites particules virtuelles* (pour les distinguer des particules réelles qui existent véritablement pendant un temps suffisamment long). On dit souvent que l'interaction* est propagée par des particules virtuelles, des quanta virtuels associés au vide* des champs*.

DIALECTIQUE

D'un mot grec qui signifie discourir, discuter. C'est proprement l'art de discuter, l'application des règles du raisonnement à la discussion. Au cours des temps le mot a pris des significations différentes. Il y'a cependant toujours une idée d'opposition, des réponses aux questions, d'un aspect des choses à un autre, des termes d'une contradiction*. Toujours présente l'idée d'une dynamique sous tendant cette opposition.

On attribue à Zénon d'Elée* l'invention de cet art de la discussion. Les Sophistes* s'en emparèrent, mais ils le discréditeront

en s'en servant pour tout contester, pour soutenir sur toute question le pour et le contre. Socrate* et Platon* le réhabilitèrent : chez eux la dialectique était l'art d'interroger, l'art d'amener l'interlocuteur à reconnaître la vérité et à s'élever graduellement à la vraie science. Les *Dialogues* de Platon offrent le plus beau modèle en ce genre. Aristote* réduisit la dialectique à une science dans ses *Topiques* et dans son traité de *La réfutation des sophistes*. Au Moyen-Age la dialectique est devenue l'argumentation ou la controverse. Dans la scholastique* on appelait en fait dialectique la logique formelle en l'opposant à la rhétorique. A la Renaissance l'idée dialectique de la « coïncidence ou de l'union des contraires » a été défendue par Nicolas de Cues* et Giordano Bruno*.

Dans la phraséologie de Kant*, dialectique est synonyme de purement probable : c'est en ce sens qu'il oppose les arguments dialectiques, qui ne reposent que sur des faits contingents*, aux arguments apodictiques* qui reposent sur des vérités nécessaires et produisent une certitude absolue. Kant utilise aussi la dialectique dans ses célèbres antinomies*.

La notion de dialectique a joué un grand rôle dans la philosophie idéaliste allemande du XIX^e siècle. Schelling* à la suite de Kant développe une conception dialectique des processus de la nature.

Mais c'est surtout Hegel* qui a fortement utilisé le terme « dialectique ». Pour lui la dialectique est cette espèce de transition d'une définition à une autre dans laquelle il apparaît que ces définitions ne sont chacune qu'un point de vue limité, ce qui fait qu'elles contiennent en elles mêmes leur propre contradiction*. Selon Hegel* « *Ce qui se meut, c'est la contradiction. (...) C'est uniquement parce que le concret se suicide qu'il est ce qui se meut.* ».

Marx* et Engels* utilisent dialectique pour désigner un principe gouvernant les choses elles mêmes. C'est le matérialisme dialectique*. Engels a formulé « les trois lois de la dialectique » :

1. La loi de la transition des variations quantitatives aux variations qualitatives.
2. La loi de l'unité et de la lutte des contraires.
3. La loi de la négation de la négation

Stephen Jay Gould, le grand spécialiste du problème de l'évolution écrit :

« Il nous faut comprendre au sein d'un tout les propriétés naissantes qui résultent de l'interpénétration inextricable des gènes et de l'environnement. Bref, nous devons emprunter ce que tant de grands penseurs nomment une approche dialectique, mais que les modes américaines récusent, en y dénonçant une rhétorique à usage politique. »

La pensée dialectique devrait être prise plus au sérieux par les savants occidentaux, et non être écartée sous prétexte que certaines nations de l'autre partie du monde en ont adopté une version figée pour asseoir leur dogme. (...) Lorsqu'elles se présentent comme les lignes directrices d'une philosophie du changement, et non comme des préceptes dogmatiques que l'on décrète vrais, les trois lois classiques de la dialectique illustrent une vision holistique dans laquelle le changement est une interaction entre les composantes de systèmes complets, et où les composantes elles-mêmes n'existent pas a priori, mais sont à la fois les produits du système et des données que l'on fait entrer dans le système. Ainsi, la loi des « contraires qui s'interpénètrent » témoigne de l'interdépendance absolue des composantes ; la « transformation de la quantité en qualité » défend une vision systémique du changement, qui traduit les entrées de données incrémentielles en changements d'état ; et la « négation de la négation » décrit la direction donnée à l'histoire, car les systèmes complexes ne peuvent retourner exactement à leurs états antérieurs. »

DIEU

La notion de dieu se présente traditionnellement sous deux formes : le dieu de la théologie naturelle ou théodicée* et le dieu des religions révélées. Un dieu objectif défini par la logique et la réflexion métaphysique, un dieu personnel issu de l'expérience ou de la révélation. Le dieu des philosophes et des savants* et le dieu dont parlent les livres sacrés des religions révélées. Un dieu immuable et intemporel, et un dieu qui intervient dans l'histoire ou s'incarne dans des personnages humains. Distinction opérée par Pascal entre le dieu des philosophes et le vrai dieu.

DIEU DES PHILOSOPHES ET DES SAVANTS (Cf. Théodicée)

DIFFRACTION

On appelle diffraction tout phénomène où la lumière ne se propage pas en ligne droite dans un milieu d'indice de réfraction constant, c.a.d. toute propagation non rectiligne que l'on ne peut interpréter comme une réflexion ou une réfraction.

La diffraction est donc un phénomène se manifestant dans les conditions où l'optique géométrique* n'est plus applicable, c.a.d. lorsque la longueur d'onde n'est pas négligeable par rapport aux dimensions des variations dans le milieu. Ceci se produit en particulier en présence d'obstacles qui perturbent le champ électromagnétique de l'onde lumineuse.

La seule méthode tout à fait rigoureuse d'étude de la diffraction consisterait à chercher à résoudre l'équation générale de propagation des ondes électromagnétiques en tenant compte des conditions aux limites introduites par les obstacles. Mais les obstacles interviennent par leur forme et leurs propriétés optiques spécifiques, qui sont souvent difficiles à préciser. La résolution numérique sur ordinateur des équations des ondes permet de résoudre tous les problèmes pratiques de propagation des ondes électromagnétique que posent les technologies contemporaines de transmission de l'information.

Les obstacles simples (trous dans écran, réseaux de fentes ou de sillons, bords d'un écran) donnent par diffraction de belles figures avec des maxima et des minima de lumière, rappelant les figures d'interférence*. L'étude de ces figures permet en général d'étudier la nature de l'obstacle, un problème inverse*, mathématiquement difficile.

Ce sont cependant de tels problèmes inverses qui ont permis d'acquérir une grande partie de notre connaissance exacte de la structure de la matière, par diffraction des rayons X* et diffraction des électrons*.

Mais on a en général recours à une méthode approchée, qui utilise le principe de Huygens-Fresnel* et ne tient pas compte des conditions aux limites réelles. Cette méthode considère la vibration en un point au-delà de l'obstacle comme la résultante d'une infinité de vibrations envoyées par des sources secondaires fictives disposées sur la portion de l'onde non masquée par les obstacles. On est ramené à un calcul d'interférences. Mais toute la question consiste à savoir quelles amplitudes et quelles phases on doit associer aux sources secondaires, et quelle est la variation de leur rayonnement avec la direction. L'amplitude de ces ondes secondaires fictives varie avec la direction d'émission (facteur d'inclinaison) selon des préceptes énoncés par Fresnel pour être en accord avec les phénomènes observés. Dans tous les cas on suppose que l'écran n'apporte pas à l'onde d'autre perturbation que la suppression des parties masquées, c.a.d. que le champ au-delà de l'obstacle, dans son voisinage immédiat, est considéré comme nul, et le champ dans les ouvertures comme identique à celui existant en l'absence de l'obstacle. La construction ou le principe de Huygens-Fresnel s'applique correctement lorsque les ouvertures sont grandes par rapport à la longueur d'onde, lorsque l'on ne prend pas en compte les sources fictives situées trop près des bords et que l'observation s'effectue suffisamment loin de l'ouverture et dans des directions voisines de l'onde incidente.

Il y'a là un tour de passe passe dans le discours du physicien.physique de Young sur l'imagination de Fresnel. Toute une série de travaux va rendre rigoureuse cette conception de la diffraction dans le cas général, avec cependant quelques écarts avec la conception de Young.

Toute cette histoire illustre admirablement les difficultés de la modélisation* et les subtilités des stratégies de simulacre*.

DIFFRACTION DES ELECTRONS

En 1927, année charnière*, Davisson et Germer en bombardant un cristal de nickel avec des électrons lents, observent une figure de diffraction*, analogue à celles observées pour la diffraction des rayons X*. Ce phénomène confirme l'hypothèse de de Broglie (1924) sur le caractère ondulatoire des particules microphysiques. Immense révolution dans la conception du monde, confortant le dualisme onde-corpuscule* de la mécanique quantique*. L'onde de Broglie* trouve là sa justification.

La diffraction des électrons s'est avérée un outil précieux, complémentaire de la diffraction des rayons X*, dans l'étude des structures cristallines et moléculaires.

En toute rigueur la diffraction des électrons doit être décrite en mécanique quantique par la résolution de l'équation de Schrödinger avec des conditions aux limites appropriées. Le problème s'avère aussi difficile que dans le cas de la diffraction* de la lumière. La physique quantique se borne à dire que le phénomène est du à la diffraction de l'onde de de Broglie* associée à l'électron. Mais c'est là une explication qui n'appartient pas à la mécanique quantique, car elle prétend ouvrir la « boîte noire ». Le physicien utilise là un modèle* pour expliquer le phénomène.

DIFFRACTION DES NEUTRONS

DIFFRACTION DES RAYONS X (Radiocristallographie)

La longueur d'onde des rayons X étant du même ordre que les dimensions périodiques des réseaux cristallins ; ceux-ci donnent lieu à de belles figures de diffraction. On peut en retirer des renseignements précieux sur la structure de la matière.

La structure en double hélice de la molécule d'ADN* a été établie a partir de données radiocristallographiques.

DIFFUSION

DIFFUSION DE LA LUMIERE

DIMENSION

DIMENSION (Analyse dimensionnelle)

DIRAC (EQUATION DE)

L'équation de Dirac est en quelque sorte la contrepartie de l'équation de Schrödinger, dans une formulation plus évoluée de la Mécanique Quantique, où l'on tient compte des contraintes de la théorie de la relativité restreinte*, la Mécanique Quantique Relativiste*.

Cette équation décrit l'évolution de l'état* du système en l'absence d'observation. Mais dans ce cas l'état n'est pas représenté par un simple nombre comme c'est le cas pour la fonction d'onde* en Mécanique Quantique ordinaire, mais par un objet mathématique à 4 composantes. Ce que l'on nomme équation de Dirac est en fait un système de 4 équations couplées.

Ceci ne fait qu'accentuer le caractère abstrait et fonctionnel de la notion d'état en Mécanique Quantique. Dirac lui même trouvait que la logique de sa théorie, quoique fort complexe, avait le mérite de la beauté. A quelqu'un lui demandant plus tard comment il avait trouvé son équation, il aurait répondu qu'il l'avait trouvée belle.

L'équation de Dirac permet de calculer les propriétés magnétiques (spin* en particulier) de l'électron, de donner consistance à l'effet Lamb*, et de prévoir l'existence de l'antimatière* dans le vide de Dirac*.

DISCRET

DISPERSION STATISTIQUE

C'est la mesure du degré de hasard* qui affecte une grandeur. La dispersion statistique mesure la manière dont les valeurs au hasard se dispersent plus ou moins autour de la valeur moyenne. Une dispersion nulle signifie que la grandeur ne prend qu'une seule valeur, et qu'elle n'est donc pas soumise au hasard. On dit qu'une telle grandeur est certaine.

DISPOSITION

Comportement possible d'un objet considéré comme attribut* ou propriété intrinsèque de l'objet. Concept voisin de ceux de puissance* ou de propensité*.

DISTILLATION

DISTRIBUTION (en mathématique)

Concept mathématique généralisant le concept classique de fonction*. On parle aussi de fonction généralisée. C'est un fonctionnelle*. La nécessité d'une telle généralisation se fait sentir dans de nombreux problèmes physiques et mathématiques liés au continu*.

La notion de distribution permet d'exprimer de façon mathématiquement correcte des concepts idéalisés comme la masse ou la charge ponctuelles, la densité de points matériels, comme la densité d'une couche simple ou double de points ou comme l'intensité d'une source instantanée.....Dans le concept de distribution on trouve le reflet du fait qu'il n'est pas possible en réalité de mesurer la valeur d'une grandeur physique en un point, mais seulement sa valeur moyenne dans un petit voisinage de ce point. C'est pourquoi les distributions sont un appareil adéquat pour la description de la répartition des valeurs de diverses grandeurs physiques, d'où leur dénomination.

La théorie des distributions vient au XXème siècle achever le calcul infinitésimal de Newton* et Leibniz* en permettant de formuler correctement de nombreux problèmes fondamentaux liés aux équations différentielles*. Les distributions permettent d'étendre le champ des solutions des équations différentielles.

La plupart des fonctions sont intégrables, alors que très peu sont dérivables. Dans la théorie des distributions au contraire, ces problèmes disparaîtront : à toute fonction continue on pourra associer des "fonctions dérivées" . De manière plus générale, toute distribution sera dérivable à tout ordre,

Cette théorie a par ailleurs l'avantage de définir la transformation de Fourier* dans tous les cas où celle ci ne l'est pas pour certaines fonctions.

Depuis le milieu des années 1920, les théoriciens de la physique quantique, et en particulier Dirac*, utilisaient des objets mathématiques étranges qu'ils manipulaient comme des fonctions. Le plus typique était la "fonction de Dirac", mystérieuse fonction qui vaut 0 partout, sauf en 0 où elle vaut $+\infty$, et dont l'intégrale* est égale à 1 (en violation de toutes les règles de la théorie de l'intégration). Non

seulement Dirac utilisait cette fonction à des fins de calcul formel, mais encore il se permettait de la dériver à volonté, se contentant de remarquer que les dérivées successives étaient “de plus en plus singulières”.

L'utilité et le caractère intuitif de ces objets rendait presque indispensable leur incorporation dans une théorie mathématique ; c'est ce qu'a réalisé la théorie des distributions. Leur interprétation est d'ailleurs très simple, et cause beaucoup moins de maux de tête que les interrogations que l'on peut avoir sur la nature des “fonctions” considérées par Dirac.

En mécanique quantique on doit introduire les distributions pour enrichir l'espace des états* (espace de Hilbert équipé*), ce qui permet de traiter de façon correcte le problème du spectre continu* des opérateurs* différentiels représentant les observables*. Les fonctions propres* correspondant aux valeurs propres d'un spectre continu sont des distributions. Peu à peu les nouveaux exposés de mécanique quantique adoptent ce langage.

La théorie des distributions a été élaborée par le mathématicien français Laurent Schwartz* et reformulée par le mathématicien soviétique Israel Gelfand* au milieu du XXème siècle. Elle avait été entrevue par Dirac* qui dans son ouvrage de fondement de la mécanique quantique utilisait la fonction δ et sa dérivée. Les besoins de la physique sont à nouveau à l'origine des développements du langage mathématique.

L'emploi des distributions permet d'éviter tous les paradoxes liés aux raisonnements en termes de points. Une véritable culture mathématique ne peut s'en passer. Fonctions et distributions sont au cœur de l'analyse mathématique*.

DISTRIBUTION (de probabilité)

DISSIPATION

La dissipation est la perte de l'énergie d'un processus ordonné d'un système dynamique* par une interaction du type frottement* entre les parties du système ou avec un milieu extérieur. L'énergie perdue est en général convertie en chaleur, ce qui correspond à une perte de cohérence si le mouvement dynamique initial était de type oscillatoire ou ondulatoire. C'est en définitive une transformation d'énergie mécanique en chaleur qui ne peut être décrite par la mécanique hamiltonienne*.

La dissipation est une source d'irréversibilité* de l'évolution du système . Les systèmes dissipatifs* sont étudiés d'un point de vue

macroscopique par la thermodynamique de non équilibre* et d'un point de vue microscopique par la mécanique statistique des processus irréversibles* et la cinétique physique*.

La dissipation apparaît dans le frottement* entre corps solides ou liquides, dans les écoulements de liquides visqueux, dans le passage du courant électrique dans un circuit où il s'amortit par suite de la résistance... En pratique tous les systèmes réels de la physique sont des systèmes dissipatifs*.

L'étude de systèmes dissipatifs s'effectue en introduisant des forces de frottement* (ou de résistance) dans les équations de la mécanique classique, mais ceci introduit des difficultés analytiques en particulier lorsque ces forces dépendent de la vitesse.

L'élégance de la mécanique classique provient de ce qu'à la suite de Galilée* on a négligé les forces dissipatives. Celles ci n'ont été réintroduites que tardivement vers la fin du XIX^e siècle pour les besoins de la théorie de la régulation* des machines à vapeur, l'hydrodynamique de la turbulence* et la théorie de l'émission des ondes radio.

Elles constituent un élément essentiel des théories de l'auto-organisation* et des structures dissipatives*.

DIVERGENCES (en théorie quantique des champs*)

DOPPLER (EFFET)

Variation de la fréquence d'une onde pour un observateur lorsque la distance relative entre l'émetteur et l'observateur varie.

Supposons que l'émetteur d'une onde monochromatique se rapproche du récepteur. Dans le temps où s'effectue une oscillation l'émetteur et le récepteur se rapprochent et donc le temps nécessaire pour l'onde pour atteindre le récepteur diminue. De ce fait la période (longueur d'onde*) perçue par le récepteur semble plus courte et donc la fréquence plus grande. C'est le contraire lorsque l'émetteur s'éloigne du récepteur. Phénomène bien connu du changement de fréquence de l'aigu au grave lorsqu'une locomotive qui siffle se rapproche de l'observateur et le dépasse.

Les formules de changement de fréquence sont différentes dans le cas où $v < c$ et dans le cas relativiste.

Dans le cas électromagnétique l'effet Doppler est un effet spectroscopique classique qui reflète le mouvement des objets

émetteurs de lumière. Ainsi dans le cas d'objets cosmiques comme les galaxies on observe un déplacement vers le rouge d'une raie par rapport à sa longueur d'onde naturelle marquant ainsi le mouvement d'éloignement (récession*) de cette galaxie, ce qui fut interprété comme une expansion de l'univers*.

DUALISME

Position philosophique ou scientifique reconnaissant l'existence de deux principes ou concepts de base irréductibles l'un à l'autre.

L'esprit* et la matière* chez Descartes*, les idées (formes intelligibles) et les choses (formes sensibles) chez Platon*, la forme* et la matière* chez Aristote* (quoique forme et matière y soient inséparables), les noumènes* et les phénomènes* chez Kant*, le monde sublunaire et le monde supralunaire chez Aristote*, la matière* et le champ* ou bien les ondes* et les corpuscules* dans la physique classique*.

L'histoire de la pensée est traversée par de très nombreuses tentatives de dépassement de toutes les formes du dualisme, pour tenter de restaurer l'Unité*. L'hylémorphisme* aristotélicien est un pur monisme de la substance.

L'Hermétisme ou l'Alchimie* dans leur conception du Grand Oeuvre ou de la Pierre Philosophale, tout comme la Mécanique Quantique dans sa conception centrale du "monisme* onde-corpuscule*", nommé en général dualisme mal à propos, sont des doctrines de l'Unité à l'encontre de dualismes régnants.

Le dualisme est alors considéré comme une symétrie* dans un système plus vaste englobant les deux principes de base.

DUALISME ONDE-CORPUSCULE

Conception constituant l'un des fondements de la théorie quantique et selon laquelle le comportement de tout objet quantique présente aussi bien des aspects corpusculaires que des aspects ondulatoires. Cette dialectique de propriétés localisées et de propriétés délocalisées est caractéristique de tous les objets quantiques: lumière*, particules élémentaires*, atomes*, groupes d'atomes comme le fullerène* C₆₀.

Le dualisme onde-corpuscule est un concept reflétant parfaitement la nature de la M.Q. Il ne témoigne pas de la structure ultime d'une réalité "comme ça", où l'on aurait à la fois une onde et un corpuscule ou bien encore une situation complexe qui ne serait ni onde

ni corpuscule. Il énonce le type de connaissance que nous pouvons avoir de l'objet quantique* à travers des observations.

Si l'on cherche à observer un aspect corpusculaire, on va le trouver. Si l'on cherche à observer un aspect ondulatoire d'après des manifestations caractéristiques – interférences*, diffraction* - on les met en évidence, dans des expériences où l'on ne peut pas observer l'aspect corpusculaire. Corpuscule et onde sont des observables non-compatibles*. Une non compatibilité qui traduit leur non indépendance inscrite au cœur de la M.Q. par la transformation de Fourier* qui relie la position et l'impulsion.

Tout se passe "comme si" l'objet quantique* était tantôt corpuscule, tantôt onde, sans l'être chaque fois pleinement.

Il n'est pas question de deux « propriétés » ni même de deux « aspects » d'une chose unique, mais de deux moments de l'acte expérimental.

C'est le "comme ça" qui nous échappe sans cesse. Le noumène* est inconnaissable, seul le phénomène* est accessible.

Pour la lumière, si l'énergie est transportée d'un seul tenant par le photon*, celui ci n'est pas une bille, et l'onde électromagnétique ne se voit pas comme une onde sur l'eau.

De même, l'électron n'est pas une boule dure et les expériences d'interférence* et de diffraction* des électrons ne laissent pas voir directement l'onde de de Broglie*. C'est toujours le corpuscule que l'on observe. L'onde ne se "devine" que par ses conséquences.

Le monde microphysique ne prend réalité qu'à travers les instruments de mesure qui le sondent et l'adaptent inévitablement à l'une ou l'autre des visées choisies pour le connaître. Nous n'avons accès à aucune structure préalable. L'univers quantique surgit au moment où il est appréhendé et se donne alors selon des caractéristiques qui s'excluent en marquant ainsi une relation intime et profonde qui nous échappe.

Le dualisme onde-corpuscule se vérifie dans de nombreuses expériences de pensée* plus ou moins réalisées en laboratoire depuis que l'on sait manipuler les particules une à une. Ces expériences mettent en jeu les phénomènes d'interférence dans lesquels on peut distinguer deux voies de passage pour la particule et où l'on peut choisir d'observer les deux voies à la fois ou chaque voie séparément. Ces deux types d'observation s'excluent mutuellement illustrant parfaitement la conception quantique des observables non-compatibles*. Parfaitement en accord avec l'idée de Bohr* que ce sont

les observations qui « créent » l'observable. Des paradoxes surgissent lorsque l'on cherche à violer ce principe.

DUALITE (vectorielle)

DUHEM-QUINE (THESE DE).

Toute théorie scientifique n'est pas suffisamment déterminée par les faits expérimentaux qui la vérifient. Il peut donc y avoir en principe plusieurs théories pour expliquer un ensemble de données ou d'observations. Un même formalisme mathématique est susceptible de recevoir des interprétations (physiques) différentes.

La sous-détermination des théories par les faits exprime le rôle que la théorie joue dans l'observation, qui ne peut ainsi à elle seule, contaminée par une théorie, permettre un choix entre différentes théories. Des auteurs comme Feyerabend sont même allés jusqu'à défendre en sens inverse que les faits sont surdéterminés* par les théories, et qu'ils sont tout bonnement créés par elles.

Des exemples de théories équivalentes sont donnés par : la cosmologie de Ptolémée et celle de Copernic, la théorie du phlogiston* et celle de l'oxygène, la théorie de l'éther de Lorentz* et la théorie de la relativité restreinte* d'Einstein*, l'électrodynamique de Weber* et l'électrodynamique de Maxwell*.

DUPLICATION D'UN ETAT QUANTIQUE (No-cloning theorem)

Un système quantique se trouve dans un état que nous ignorons. Pour des raisons opératoires nous pouvons désirer une copie du système, c'est-à-dire un système dans le même état. Cette copie s'avère impossible à cause de la linéarité de la mécanique quantique. Lorsque l'état est connu la copie s'avère évidente car on connaît la procédure de préparation de l'état.

Ce théorème pourrait avoir des conséquences néfastes pour certaines procédures, mais il s'avère d'une importance vitale en cryptographie quantique*.

En fait c'est un théorème d'une importance fondamentale car il empêche la communication superluminale à travers l'enchevêtrement quantique* et sa non vérification permettrait à son tour d'effectuer la mesure simultanée d'observables non compatibles.

L'importance de ce théorème est telle qu'il est pris comme interdiction fondamentale dans des axiomatiques quantiques*.

Remarquons que dans la téléportation quantique* un état quantique inconnu est transféré d'un système sur un autre grâce à l'enchevêtrement*, mais au prix de sa destruction. La copie détruit

l'état d'origine, si bien qu'il n'y a jamais coexistence de l'original et d'une copie d'un état inconnu.

DYNAMIQUE HYPERBOLIQUE

La dynamique hyperbolique est l'étude générale des systèmes dont les trajectoires de phase sont des flots géodésiques sur les surfaces à courbure négative de la géométrie hyperbolique*. Cette étude initiée par Poincaré* et Hadamard*, fut poursuivie dans les années 30 par Hedlund et Hopf* dans le cadre de la théorie ergodique, et reprise dans les années 60 par Anosov*, Sinai* et Smale* qui établirent la chaotité et la stabilité structurelle* de ces systèmes. La dynamique hyperbolique est caractérisée par la présence d'une direction dilatante et d'une direction contractante ce qui a pour effet un comportement complexe sur un temps long, en fait l'apparition du chaos* déterministe.

L'hyperbolicité est une propriété de systèmes dynamiques exprimant un type particulier de comportement des trajectoires. Elle est caractérisée par le fait qu'au voisinage immédiat de toute trajectoire il existe des trajectoires qui s'en rapprochent et des trajectoires qui s'en écartent asymptotiquement. En gros une image qui rappelle le comportement des trajectoires au voisinage d'un point selle singulier. Les systèmes dynamiques particuliers présentant ce comportement sont dits systèmes dynamiques hyperboliques et ont une topologie de l'espace de phase assez complexe.

DYNAMIQUE MOLECULAIRE

DYNAMIQUE NON LINEAIRE ET CHAOS

DYNAMIQUE NONLINEAIRE ET CHAOS (Epistémologie)

La dynamique non linéaire et le chaos, éléments du néo mécanisme* de la théorie des systèmes dynamiques*, introduit par rapport à la mécanique classique* deux situations qu'elle ignorait : le comportement irrégulier (chaotique*) et le frottement* (systèmes dissipatifs*). Dans ses considérations elle maintient la distinction entre

systèmes hamiltoniens* et systèmes dissipatifs*, tout en marquant des analogies de comportement.

Les systèmes hamiltoniens (non dissipatifs) sont souvent appelés conservatifs, mais ce terme introduit une confusion avec la conservation de l'énergie. L'énergie d'un système hamiltonien peut ne pas être conservée si l'hamiltonien dépend explicitement du temps. Mais même dans ce cas le volume de phase est conservé.

Les systèmes dissipatifs ont la particularité de présenter des attracteurs*, avec souvent dans les cas chaotiques des attracteurs étranges* à structure fractale*.

La stochasticité n'est possible que dans un système non linéaire.

On opère aussi une distinction entre systèmes simples à peu de degrés de libertés et systèmes complexes. La grande nouveauté est la possibilité de comportement stochastique* des systèmes simples qui semblait jusqu'alors réservée aux systèmes complexes.

On peut dresser le tableau suivant des différentes situations.

On y distingue les systèmes simples (S) et les systèmes complexes (C) selon qu'ils sont hamiltoniens (H) ou dissipatifs (D), puis réguliers (1) ou chaotiques (2).

1 Oscillations périodiques non linéaires* (pendule)

SH

2 Systèmes chaotiques* : hamiltonien de Hénon Heiles, billard de Sinai

1 Systèmes auto oscillants* périodiques :générateur de van der Pol* et autres systèmes à cycle limite*.

SD

2 Systèmes auto oscillants stochastiques : modèle de Lorenz* et autres systèmes avec un attracteur étrange*.

1 Systèmes intégrables* et presque intégrables : théorie KAM* équations de Korteweg de Vries et Sine-Gordon, chaine de Toda.

CH

2 Gaz idéal et système de Sinai* de boules dures dans une boîte.

1 Structures dissipatives autoorganisées* : cellules de Bénard* et autres phénomènes de la Synergétique*.

CD

2 Turbulence* développée dans les fluides et les plasmas.

La transition vers le chaos* se présente de manière analogue dans les systèmes hamiltoniens et les systèmes dissipatifs. Il s'y manifeste des phénomènes universels.

La stochasticité intrinsèque est correctement identifiable à la stochasticité physique dans les systèmes hamiltoniens déterministes. Les systèmes dissipatifs sont plus difficiles à examiner car ils comportent un élément stochastique externe responsable du frottement.

Les systèmes dissipatifs posent la problème de la relation entre les attracteurs des modèles théoriques et les attracteurs expérimentaux. Ceci est dû à ce que la dissipation est physiquement un phénomène stochastique dont le modèle mathématique en général utilisé dans la théorie des systèmes dynamiques ne retient que la partie moyenne, et ignore les fluctuations restantes. Dans le système dissipatif expérimental ces fluctuations sont présentes et l'on peut se demander si elle ne jouent pas un rôle dans le chaos observé. Existe-t-il expérimentalement dans ces systèmes du chaos* sans bruit* ?

L'engouement pour l'étude du chaos dans les systèmes dissipatifs* est sans doute dû à leur importance considérable pour les phénomènes de turbulence*, mais provient aussi pour une bonne part du succès de curiosité provoqué par la découverte des attracteurs étranges*.

Ruelle et Takens ont à l'origine donné ce nom à un attracteur d'un système dissipatif présentant une structure topologique compliquée et étrange, en fait une structure fractale*. A partir de 1975, à la suite de B. Mandelbrot, on utilisera le terme de structure ou objet fractal pour désigner un objet géométrique dont la propriété fondamentale est de posséder une dimension* de Hausdorff fractionnaire.

Comme les attracteurs étranges d'abord rencontrés se sont trouvés être les supports d'un mouvement chaotique on a commencé par appeler attracteurs étranges les attracteurs sur lesquels se produisait un mouvement chaotique. Une confusion certaine s'en est suivie car il n'est pas clair dans les écrits si le terme « étrange » signifie fractal ou chaotique, ou les deux à la fois. Cette confusion entre fractal et chaotique persiste malgré la distinction claire établie par

Mandelbrot entre un objet fractal général et un objet fractal chaotique. Il existe en fait des attracteurs chaotiques non fractals et il y'a aussi des attracteurs fractals non chaotiques.

La démonstration rigoureuse de l'existence du chaos déterministe n'existe pour l'instant véritablement que pour des systèmes hamiltoniens* sauf pour l'attracteur de Lozi* et l'attracteur de Lorenz*.. Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodes analytiques permettant de calculer la position des attracteurs chaotiques et d'étudier le caractère d'instabilité du mouvement sur ces attracteurs. Toute l'information disponible a été obtenue au moyen de simulations* numériques sur ordinateur.

Par ailleurs l'affirmation de l'existence d'un chaos déterministe intrinsèque est délicate pour les systèmes dissipatifs. Car l'existence de la dissipation implique toujours que le système étudié n'est pas isolé et se trouve soumis à des actions aléatoires* extérieures. Les modèles mathématiques étudiés ne retiennent en général que la partie moyenne de ces actions aléatoires et sont donc artificiels et insuffisants, car ils ignorent les fluctuations* toujours présentes dans une dissipation physique. Le chaos n'ayant pas été véritablement démontré au plan théorique pour les systèmes dissipatifs, les données de la simulation sur ordinateur ne permettent pas de trancher entre un chaos parfait et une quasi périodicité* très proche du chaos. Par ailleurs les systèmes dissipatifs physiques comportant toujours un bruit* extérieur il est difficile d'affirmer qu'ils sont le siège de phénomènes chaotiques propres.

DYNAMIQUE NON LINEAIRE ET CHAOS (Histoire)

Le XX° siècle voit s'ouvrir un nouveau grand chapitre de la mécanique classique, celui de la dynamique non linéaire* et du chaos*, créant un lien multiforme entre mécanique et phénomènes non prédictibles (imprévisibles), et promouvant des concepts fondamentaux sur la complexité des systèmes simples. Chapitre arborescent, trahissant ses origines variées par l'apparition d'un puzzle de concepts dont le raccord n'est pas toujours évident même pour les acteurs du domaine. Une brève histoire s'impose des différents courants menant vers 1970 à la prise de conscience de l'émergence d'une science nouvelle qui change profondément la vision du monde. Il n'est pas sans intérêt de souligner que cette révolution scientifique s'appuie sur deux des grandes avancées technologiques du siècle, la radioélectricité et l'informatique. Par ailleurs le développement à partir de 1930 de la théorie des probabilités et des

processus stochastiques mettant en place une image aléatoire du monde servira d'arrière plan à bien des considérations. L'histoire de la dynamique non linéaire ne se développe pas d'une manière continue et logique, mais est constituée par l'entrelacement de nombreux thèmes qui contribuent peu à peu à la mise en place d'une nouvelle culture non linéaire*.

La préhistoire du domaine est dans un des grands défis technologique du XIX^e siècle, la stabilisation des régulateurs des machines. La régulation* était au centre de l'intérêt de tous les ingénieurs qui pensaient que l'amélioration de la qualité des régulateurs passait par la diminution des frottements mécaniques. Les travaux de Maxwell*, Vichnegradsky* et Stodola montrèrent le rôle essentiel du frottement dans la régulation. La dissipation, exclue de la mécanique classique, réapparaît au premier plan et ne va cesser de jouer le rôle de vedette.

Entre 1881 et 1886 Henri Poincaré inaugure une nouvelle démarche dans la mécanique classique issue des travaux de Newton*, Lagrange*, Laplace* et Hamilton*. A la recherche de solutions exactes des équations de la mécanique il substitue une théorie qualitative des équations différentielles*, qui fournit une caractérisation globale des solutions, en particulier lorsque les équations ne sont pas intégrables. Cette notion de non intégrabilité* va jouer un rôle fondamental dans la reconnaissance en mécanique classique de situations très complexes dont les trajectoires homocliniques* forment le paradigme. Poincaré introduit dans une science jusqu'alors adossée à l'analyse mathématique des considérations géométriques et topologiques, en s'intéressant à l'espace de phase*, en classant les points singuliers des solutions en deux dimensions (centre, selle, nœud, foyer), en révélant l'existence des cycles limites*. Dans les années 1920 cette approche topologique sera développée par Georges D. Birkhoff qui introduira la dénomination de systèmes dynamiques*.

L'étude du problème des trois corps en mécanique céleste a permis à Poincaré de développer la théorie des perturbations, de comprendre le rôle qu'y jouent les interactions de résonance responsables de la divergence des séries, et d'étudier sous un jour nouveau le problème de la stabilité du mouvement*. C'est cette étude de la stabilité qui sera au centre de l'œuvre du russe Alexandre Lyapounov*. Dans les années 1950 Andrei Kolmogorov* travaille sur la stabilité des systèmes hamiltoniens et obtient avec Vladimir Arnold* et Jurgend Moser le fameux théorème KAM qui affirme que lors de l'introduction d'une interaction entre mouvements non linéaires quasi périodiques* avec des rapports irrationnels entre les fréquences, le

caractère quasi périodique se conserve. Résultat qui signifie aussi que la plupart des systèmes hamiltoniens non intégrables ne sont pas ergodiques. En 1954 Kolmogorov vint à Paris et ne trouva personne avec qui parler de ce sujet à l'Institut Henri Poincaré. Il faudra attendre le début de l'emploi d'ordinateurs pour acquérir la conviction de la réalité des situations complexes en mécanique (Hénon-Heiles 1964) et stimuler l'intérêt pour ces problèmes.

La mécanique statistique classique*, avec l'hypothèse ergodique* de Boltzmann*, est la source de travaux sur le comportement des trajectoires de phase. Cette hypothèse affirme que les trajectoires de phase parcourent toute l'hypersurface d'énergie constante d'une manière uniforme, cad en séjournant dans chaque volume de phase proportionnellement à son volume. En 1913 on a montré que c'était impossible et Paul Ehrenfest* a modifié cette hypothèse en considérant que la trajectoire de phase doit passer aussi près que possible de tous les points de l'hypersurface. L'apparition de l'ordinateur a permis à Fermi* Pasta et Ulam* en 1954 de montrer un résultat inattendu : dans une chaîne d'oscillateurs couplés au lieu d'une relaxation vers un équilibre thermodynamique on observe un processus quasi périodique. Un tel résultat s'avèrera conforme au théorème KAM. On a même pu penser qu'il serait très difficile de trouver des systèmes hamiltoniens ergodiques. En fait un système hamiltonien typique n'est ni intégrable, ni ergodique, mais présente des zones de quasipériodicité accolées à des zones de chaotité. C'est là sans doute le paradigme central de toute la physique non linéaire : un extraordinaire mélange des genres dont la théorie KAM révèle la subtilité.

Entre temps un jeune physicien soviétique Nicolas Krylov, élève de Fock, avait introduit l'idée révolutionnaire que l'ergodicité* n'était pas la propriété suffisante pour assurer le fondement de la mécanique statistique, mais qu'une propriété plus forte introduite par Gibbs était requise, le mélange*. Il cherche à lier le caractère mélangeant d'un système mécanique à une instabilité locale. S'inscrivant dans une tradition mathématique remontant à Hadamard*, Hopf et Hedlund, il cherche la solution de son problème dans l'étude des lignes géodésiques sur des surfaces à courbure négative constante. En fait Krylov ne croit pas pouvoir trouver de systèmes mélangeants réalistes. De tels systèmes ne seront trouvés qu'à la suite des travaux d'Anosov et de Sinai.

L'acte central de toute cette histoire va se jouer dans un passage de relais de physiciens vers des mathématiciens, dans un rebond entre l'Ecole soviétique des radiophysiciens d'Andronov* à Gorki et l'Ecole

mathématique de Moscou sous la houlette de Kolmogorov, avec pour intermédiaire l'Ecole non linéaire américaine fondée par Salomon Lefschetz et représentée par Steven Smale. Un acte dont la toile de fond est la profonde culture non linéaire des physiciens soviétiques mise en place par les travaux de l'Ecole de Gorki, qui n'a jamais cessé d'être en contact avec le monde mathématique de Moscou. Les travaux de l'école de Gorki sur les oscillations non linéaires étaient connus en Amérique grâce en particulier à la traduction du livre de 1937 d'Andronov, Vitt et Khaikin. Un acte où se manifeste l'aspect central de toute l'aventure non linéaire, l'examen des problèmes de stabilité du mouvement inauguré par Poincaré et Lyapounov. Avec la révélation du rôle central joué par la dissipation dans la stabilisation de la rétroaction* responsable de la régulation* dans les auto-oscillateurs*. Avec un nouveau héros cette fois ci, la stabilité structurelle*.

Introduite en 1937 par Andronov* et Pontryaguine la notion de système structurellement stable est certainement une des plus importante de la théorie qualitative des systèmes dynamiques. Un système structurellement stable est un système qui conserve ses propriétés qualitatives essentielles lors d'une faible perturbation. C'est une stabilité globale du portrait de phase. Les auteurs du concept ont démontré que l'immense majorité des systèmes dynamiques à deux dimensions est structurellement stable. Mais en 1960 Steven Smale* a démontré que ce n'est plus le cas pour des dimensions supérieures à 2. Comment retrouver alors des systèmes structurellement stables ? Sous l'influence de l'œuvre de Smale, le mathématicien soviétique Anosov*, élève de Pontryaguine*, va axiomatiquement définir une catégorie générale de systèmes (systèmes d'Anosov) structurellement stables et va démontrer que ce sont des systèmes stochastiques au sens de Kolmogorov* (K systèmes). Ce qui prouve en passant que des systèmes hamiltoniens* peuvent être structurellement stables. Ces systèmes vérifient certaines conditions qui sont en particulier vérifiées par les flots associé aux géodésiques sur les variétés à courbure négative. C'est en quelque sorte une généralisation et une axiomatisation de ce système paradigmatique étudié par Hadamard, Morse, Hopf, Hedlund et Krylov et qui constitue le cœur de la dynamique hyperbolique*.. Notons en passant que sous l'influence de l'école américaine le mathématicien français René Thom* a entrepris avant 68 de faire de la stabilité structurelle le thème central de ses réflexions, publiant en 1972 « Stabilité structurelle et morphogénèse » point de départ d'une spéculation sur les formes constituant la théorie des catastrophes*. De son côté Steven Smale*, reprenant les démarches de Poincaré* et de

Birkhoff* met en place une approche topologique des systèmes dynamiques qui aura une grande influence. Il développe la théorie de la dynamique hyperbolique*. Il montre le rôle des structures homocliniques* dans la stochasticité.

A vrai dire l'instabilité stochastique des vibrations non linéaires a été semblée observée pour la première fois dans des expériences numériques en 1953 par Goward et Hine dans le cadre de l'étude de l'instabilité des faisceaux de particules dans les accélérateurs. Ils ont obtenu un critère d'instabilité. B. Chirikov travaillant dans ce même domaine a fourni dès 1959 des évaluations analytiques et des arguments en faveur du caractère stochastique de cette instabilité. Ce dernier point de vue a été confirmé par la suite dans une série de travaux dont le compte rendu a paru dans la thèse de doctorat de Chirikov et une monographie de son élève Zaslavsky (1969, 1970). La thèse de Chirikov a eu un grand retentissement car il y prenait ouvertement le contrepied de l'opinion de physiciens renommés comme Landau ou Prigogine qui défendaient l'idée que la stochasticité n'apparaissait que dans les systèmes à très grand nombre de degrés de liberté. Il est apparu que l'instabilité de systèmes simples est un cas particulier d'apparition de lois statistiques. Le lien de celles-ci avec l'instabilité a été remarqué tout d'abord sur un exemple spécialement construit par Hedlund et Hopf*, analysé en détail par Krylov* et démontré rigoureusement dans des conditions très générales par Anosov et Sinai.

Effectivement Yakob Sinai* un élève de Kolmogorov, va prouver que certaines catégories de billards* plans sont des systèmes d'Anosov et donc des K-systèmes*. Publiée en 1970, cette démonstration, qui adapte en fait des techniques introduites par Hopf, fait sortir le problème de la stochasticité hors des mathématiques pures et inaugure véritablement une ère d'étude du chaos dans les systèmes physiques. L'académique transformation du boulanger* n'est plus le seul exemple de système mélangeant. La démonstration de Sinai eut un grand retentissement. Elle donne un véritable droit de cité dans la panoplie des conceptions de l'univers physique. Cette démonstration couronne en quelque sorte les démarches de la physique non linéaire en s'appuyant sur les travaux des mathématiciens en particulier ceux de l'école de Kolmogorov. Ce sont des physiciens occidentaux comme J.L. Lebowitz, O. Penrose et J. Ford qui vont dès le début des années 70 propager la bonne nouvelle du billard de Sinai. Ce que l'on appellera le « chaos » s'installe dans la pratique des physiciens et des biologistes. Non sans une certaine résistance idéologique qui se manifeste dans la réticence des grandes revues de vulgarisation à

publier un article sur le sujet. Il faudra attendre 1981 pour que Sinai publie dans la revue russe « Priroda » son article fameux « L'aléatoire du non aléatoire ».

Tous ces développements ont été anticipés et préparés par les travaux, entre les deux guerres, des radioélectriciens sur l'engendrement et la stabilité des oscillations non linéaires, sujet majeur lié au développement de la radio. Ce sont les travaux de Balthazar van der Pol*, auteur d'une célèbre équation pour les oscillations non linéaires dans des systèmes dissipatifs* et Alexandre Andronov* et son école, définissant les auto oscillations* comme la manifestation des cycles limites* de Poincaré. Ceci marque la réintroduction du frottement dans la mécanique. L'étude de l'équation de van der Pol en 1945 par des mathématiciens comme Cartwright et Littlewood a révélé l'étonnante complexité de ses solutions. Bien des difficultés de communication entre physiciens et mathématiciens, viendra de ce que les premiers développent une culture d'ingénieurs centrée de façon réaliste sur les systèmes dissipatifs* alors que les seconds se concentrent sur les systèmes hamiltoniens*. L'école d'Andronov cependant assurera le lien de par son emploi systématique des méthodes mathématiques de Poincaré et Lyapounov. C'est le cas dans l'étude des bifurcations*. C'est typiquement le cas dans l'introduction de la notion de stabilité structurelle, stabilité globale topologique des trajectoires de phase. En 1937 paraît le livre fondateur d'Andronov, Vitt et Khaikin, « Théorie des vibrations » qui demeure un classique des systèmes dynamiques pour les physiciens. A partir de 1970 est créée à Gorki une école biannuelle de dynamique non linéaire et de chaos propageant largement la culture non linéaire chez les physiciens et mathématiciens soviétiques, avec à peu près dix ans d'avance sur l'occident.

En occident la dynamique non linéaire s'introduit à travers la thermodynamique de non-équilibre* dans les systèmes ouverts*. L'école de Bruxelles (Prigogine*) étudie ainsi l'apparition de structures stationnaires, dites structures dissipatives*, dans des systèmes ouverts* dans des conditions de non équilibre et de non linéarité. Ceci contribue à consolider le paradigme de l'auto-organisation* spatiale déjà présent dans les travaux pionniers sur la morphogénèse de Turing* en 1954. Ces travaux soulignent la complémentarité de l'approche thermodynamique (à nombreuses variables) et de l'approche dynamique (à peu de variables). Les rapports entre les courants thermodynamiques, cinétiques et dynamiques, exprimés à travers différentes écoles (Ecole de Bruxelles, Synergétique*) sont complexes et souvent peu explicités. Cette

confluence d'intérêt se manifeste dans la création du concept commun d'auto organisation*.

La théorie des systèmes dynamiques va aussi profiter de l'extraordinaire développement des idées probabilistes dans l'après deuxième guerre mondiale, où les besoins des télécommunications et de l'informatique naissante conduisent à l'élaboration de la théorie des processus aléatoires* et de la théorie de l'information*. Là aussi la position prééminente de l'école soviétique est remarquable. C'était l'époque où les probabilistes apprenaient le russe pour pouvoir consulter les volumes de la mémorable collection à couverture blanche de « Théorie des probabilités et statistique mathématique » publiée à Moscou par les Editions Naouka. C'était le reflet des travaux d'une école créée par l'immense mathématicien A.N. Kolmogorov* qui fut au carrefour de tous les courants qui renouvelèrent la vision du monde dans la révolution technologique de l'après guerre. Son nom reste tout d'abord attaché au fondement axiomatique de la théorie des probabilités et au développement d'une théorie générale des processus aléatoires. Ce faisant il est l'auteur d'une synthèse conceptuelle qui ne se démentira pas au long de son œuvre et qui réalise les retrouvailles de la logique et de la mécanique dans un esprit tout à fait aristotélien. Ce qui apparaît en particulier à partir de 1950 lorsqu'il applique la théorie de l'information (entropie de Kolmogorov-Sinai*) et la logique (complexité aléatoire*) à l'étude des systèmes dynamiques et des fonctions. Le mérite de Kolmogorov est d'avoir su utiliser l'extraordinaire poste d'observation que constituait la théorie des processus aléatoires pour rabattre sur les systèmes dynamiques les techniques et les concepts à l'œuvre chez les probabilistes. Il développe sans cesse l'idée d'une étude parallèle de la complexité dans les phénomènes déterministes et de la régularité dans les phénomènes aléatoires.

Dans le sillage des probabilistes et des théoriciens de la méthode de Monte Carlo* depuis les années 50 s'effectuent de nombreux travaux sur les propriétés statistiques des suites de nombres arithmétiques. On sait que la propriété de distribution uniforme de la suite (suite équidistribuée*) définie par Henri Weyl (1916) est équivalente à l'ergodicité*. Cette propriété n'assure pas à la suite un caractère aléatoire, mais suffit pour assurer la convergence de calculs de Monte Carlo lors par exemple de l'intégration numérique d'intégrales multiples. Ce type de suite est dit « quasi-aléatoire*. La suite ne prend un caractère vraiment aléatoire que si en plus de l'équidistribution elle présente une perte de mémoire au cours de l'engendrement des nombres successifs de la suite. Mathématiquement

ceci s'exprime par la décroissance asymptotique vers zéro de la fonction d'auto corrélation des nombres de la suite. Définition équivalente à celle du mélange*. C'est cette propriété que Jean Bass (Paris) a qualifié en 1959 de pseudo aléatoire. Dans un système mélangeant presque toutes les trajectoires ont ce caractère pseudo aléatoire. Ce sont des fonctions pseudo aléatoires*. Publiée essentiellement en français l'œuvre fondamentale de Bass est peu connue en milieu anglo saxon et l'on ne cite pas Bass lorsque l'on considère la décorrélation comme une mesure essentielle de l'apparition et du degré de chaos dans la hiérarchie ergodique. Jean Bass était un probabiliste qui était passé par la météorologie et avait connu les pionniers bien oubliés du monde aléatoire Dedebant et Wehrlé. Sa contribution essentielle a moins marqué les esprits parce qu'il ne fournissait aucun moyen théorique pour démontrer l'existence de solutions stochastiques, il permet seulement de les reconnaître lorsqu'elles ont été produites.

La biologie théorique est à la source de la production de suites de nombres par le biais de relation de récurrence, pour décrire le comportement de certaines populations. C'est ainsi que l'on a considéré avec succès certaines relations de récurrence non linéaire comme la fameuse relation logistique*. Cette relation a montré l'existence de dynamiques complexes. En 1964 Sharkovsky a établi les lois les plus générales de la coexistence de cycles de période différente dans les transformations ponctuelles à une dimension. Mais ce résultat passa inaperçu et en 1975 Li et Yorke montrèrent l'existence d'une infinité de cycles dans la relation logistique pour certaines valeurs du paramètre. C'est dans ce travail qui frappa les esprits que fut introduit le terme « Chaos » pour désigner les phénomènes stochastiques dans les systèmes déterministes. Dans le milieu des années 70 il est bien connu que lors de l'augmentation du paramètre dans la relation logistique on assiste à une succession de bifurcations avec doublement de période des cycles produits. Ces résultats de calculs par ordinateur sont bien représentés chez le biologiste Robert May (1976). C'est alors que Mitchell Feigenbaum (1978, 1979) a montré que les points de bifurcation à doublement de période tendent vers une limite qui est le seuil de l'apparition du chaos. Cette transition vers le chaos par doublement de période avec un caractère universel a été démontrée dans de très nombreux systèmes physiques contribuant dans les années 80 à rendre le sujet du chaos populaire chez les physiciens, en stimulant en particulier l'étude d'autres mécanismes de transition vers le chaos.

Le dernier volet de cette histoire tortueuse se trouve en hydrodynamique en particulier dans l'examen des problèmes de turbulence*. La turbulence a donné lieu à de nombreuses théories dues en particulier à Heisenberg*, Kolmogorov* et Landau. En 1963 le météorologue Edward Lorenz* a publié un article « Sur l'écoulement déterministe non périodique » dans lequel il étudiait le résultat de l'intégration numérique d'un système de trois équations différentielles ordinaires, modélisant la dynamique d'un liquide sujet à convection par réchauffement de sa base inférieure. L'analyse des résultats montra une dynamique complexe et une instabilité des trajectoires dans l'espace de phase. Mais publié dans un journal de météorologie ce résultat n'attira pas l'attention, et ce n'est que plus tard que l'on se mit à attribuer à Lorenz la paternité du chaos. En 1971 David Ruelle* et Floris Takens reprenant la théorie de la turbulence de Landau en la critiquant ont montré l'existence d'une dynamique turbulente avec l'apparition d'une instabilité des trajectoires de phase, caractérisée par le caractère continu du spectre d'autocorrélation*, ce qui est la propriété fondamentale des fonctions pseudoaléatoires* de Bass. Ceci était lié à l'apparition dans l'espace des phases d'un « attracteur étrange* », terme et concept clé qui valu sa popularité à ce travail. L'instabilité des trajectoires de phase sur l'attracteur étrange s'accompagnait d'une structure géométrique particulière, celle d'un fractal*. L'intérêt de ce travail était non pas tant dans la théorie de la turbulence que dans le modèle général qu'il proposait pour les phénomènes dissipatifs.

Pour résumer le sujet, rappelons ici les quatre composantes conceptuelles de cette révolution scientifique* :

- 1) Le développement de la théorie ergodique* et l'établissement de ponts entre la description déterministe et stochastique des systèmes dynamiques. C'est dans ce cadre que prennent place, la notion essentielle de système mélangeant*, le théorème KAM sur l'existence de tores intégraux dans les systèmes dynamiques hamiltoniens, le concept d'entropie des systèmes dynamiques. L'étude de cas concrets a joué un rôle décisif, en particulier celui du comportement d'une particule sur une géodésique dans un espace à courbure négative. Les travaux de Sinai sur le billard plan et sur les systèmes de sphères dures à collisions élastiques sont un des accomplissements de cette voie.
- 2) La formulation d'une théorie topologique générale des systèmes dynamiques par Steven Smale*, avec en

particulier la définition des systèmes dynamiques hyperboliques*, structurellement stables, mais à mouvement instable car un élément de volume de l'espace de phase s'étire exponentiellement dans une direction et se comprime dans une autre.

- 3) L'étude des structures homocliniques* et de leur rôle dans l'apparition de mouvements complexes chaotiques dans les systèmes dynamiques. Ce sont elles qui sont responsables de l'apparition de la stochasticité dans les équations de Lorenz.
- 4) Les vicissitudes dans les fondements de la mécanique statistique* et dans l'obtention d'une théorie de la turbulence*.

Cette longue histoire sur près d'un siècle n'aboutit pas à une théorie générale des phénomènes chaotiques, car elle fut en fait une recherche de cas d'existence de ces phénomènes, sans véritable stratégie d'ensemble, ce qui explique son caractère tortueux. Elle a assisté à la naissance de nombreux concepts qui se pressent pour l'analyse de phénomènes que l'emploi de l'ordinateur révèle. Une grande synthèse reste à venir, décrivant l'apparition et le déroulement des phénomènes chaotiques. En lançant en 1985 une série de publications ayant pour objectif de survoler l'ensemble des mathématiques contemporaines pour en dégager les grandes tendances, la communauté mathématique soviétique a choisi de manière significative de publier d'abord 9 volumes consacrés aux systèmes dynamiques sous tous leurs aspects mathématiques. Ces volumes sont écrits et dirigés par les trois acteurs principaux de l'école soviétique des systèmes dynamiques, Anosov, Arnold et Sinai*. Ces volumes ont été traduits en anglais par Springer Verlag et consacrent l'importance majeure du sujet.

Lorsque l'on veut apprécier l'immense impact scientifique et culturel du chaos déterministe il suffit de rappeler qu'il prend part au débat scientifique et métaphysique qui domine le XX^{ème} siècle, celui sur la nature du hasard*. Débat qui concerne autant le monde classique que le monde quantique. Débat opposant l'objectivité du hasard à la subjectivité liée à notre ignorance. Le chaos déterministe fait pencher la balance du côté de l'objectivité quoique les tenants de la sensibilité aux conditions initiales tiennent souvent un discours mettant l'accent sur l'ignorance. Dans le chaos déterministe le hasard surgit des conditions mêmes d'existence du système dynamique. Le chaos déterministe fait partie intégrante du paysage intellectuel du siècle dernier ce qui explique les polémiques et les résistances

idéologiques auxquelles il a donné lieu, ce qui n'a pas souvent facilité son développement scientifique. L'histoire douloureuse du chaos déterministe participe aussi largement des méandres de l'histoire de la mécanique statistique*, quoiqu'elle limite généralement son intérêt à des systèmes à peu de degrés de liberté. On a pu prétendre chez des physiciens que le chaos déterministe rendait compte de l'irréversibilité*. Il n'en est rien et le problème reste entier. Tous les enjeux du réductionnisme* s'expriment là pleinement. L'histoire du chaos déterministe s'insère aussi dans les péripéties de la modélisation* et de la simulation* des phénomènes naturels rendues possibles par l'emploi de l'ordinateur.

La dynamique des systèmes non linéaire s'inscrit dans le paysage scientifique et culturel de la deuxième moitié du XX^e siècle où d'autres discours interdisciplinaires ont occupé le devant de la scène, tels la cybernétique*, la théorie générale des systèmes* et la théorie de l'information*. La dynamique non linéaire s'est imposée comme discours dominant ouvrant la voie à un autre discours celui de la théorie des systèmes complexes*.

On peut discuter pour savoir si la dynamique non linéaire constitue une révolution scientifique* ou une évolution scientifique, dans la mesure où elle ne met pas en cause la mécanique classique mais la complète. L'histoire de cette évolution est édifiante car elle s'étale sur tout un siècle et met en jeu de nombreux acteurs dans des disciplines souvent fort différentes. Mathématiciens, physiciens, ingénieurs, biologistes et chimistes mêmes exercent leurs efforts chacun de leur côté avec des rencontres décisives. Un cloisonnement qui rend impossible la construction d'une « histoire » de ce domaine sur une base objective. On peut cependant dire que l'héritage de Poincaré, long à se transmettre ne s'est jamais perdu. Héritiers conscients ou involontaires dans des domaines distincts dont chacun a sa cohérence et s'ouvre sur de nouvelles perspectives.

L'histoire retrospective de la seule approche des systèmes dynamiques* constitue une reconstruction à posteriori qui non seulement regroupe des travaux aux motivations diverses, mais ignore de nombreux autres éléments de la « culture non linéaire* » comme la mécanique des fluides et la turbulence*, la physique statistique* et la thermodynamique de non équilibre, la radioélectricité*, l'automatique* et la théorie de la régulation, la météorologie, la dynamique des populations..... Cette reconstruction est grandement marquée par l'interprétation qu'a donné Smale* de sa propre expérience. Il se situe lui-même au carrefour de trois traditions plus ou moins séparées :

celle de l'école d'Andronov* à Gorki reprise après la guerre par Lefschetz qui valorise la stabilité structurelle*

celle de Poincaré* et Birkhoff* sur la théorie qualitative des équations différentielles*

celle de la radioélectricité avec la célèbre équation de Van der Pol* étudiée par Cartwright et Littlewood.

Dans les années 60-70 des événements vont rompre le sentiment que tous ces travaux sont de nature académique, à l'instar de la fameuse transformation du boulanger* de Hopf*. Le travail de Lorenz* en météorologie, la démonstration de Sinai* de la chaotité d'un billard plan et les résultats de Ruelle* sur la turbulence*, vont progressivement légitimer le chaos déterministe dans l'étude de la nature. L'arrivée sur le terrain des simulations numériques sur ordinateur* vont élargir le champ de ces travaux et leur donner consistance. La mise en évidence, par Jacques Laskar, en 1989, d'une dynamique chaotique inattendue dans le mouvement des planètes du système solaire est le fruit spectaculaire de ces travaux numériques. Des conférences multidisciplinaires commencent à se réunir, comme par exemple les écoles d'hiver à Gorki et en 1977 la conférence sur les bifurcations à New York, pour les 75 ans de Hopf, qui y assiste.

Les années 80 sont marquées par la vulgarisation des travaux sur la thermodynamique de non équilibre* consécutive à l'attribution du Prix Nobel de chimie à Prigogine*. A partir des années 85 la libéralisation en Russie va favoriser les échanges avec les chercheurs russe et diffuser les résultats majeurs de l'école mathématique soviétique.

Il ne faut jamais perdre de vue que toute cette histoire se déroule avec comme toile de fond toutes les discussions sur l'interprétation du hasard* liées au développement de la théorie des probabilités et de la théorie des processus aléatoires.

Ce grand chapitre d'histoire des sciences mérite que l'on s'y attarde car il est un exemple frappant des mérites de l'interdisciplinarité qui joue un rôle de plus en plus important dans le développement des sciences. Il illustre de manière frappante comment la science se construit à partir d'approches disparates. La culture scientifique est une maîtrise raisonnée du multiple, traduisant la collectivité de l'effort pour la connaissance*.

DYNAMIQUE NON LINEAIRE ET CHAOS (Problèmes philosophiques)

Le problème philosophique majeur du chaos dans les systèmes dynamiques* est la distinction entre les caractères ontologiques et les caractères épistémiques*. Entre les problèmes de la nature véritable du chaos et ceux de la connaissance du chaos. Car si le chaos est comme du hasard sans être du hasard, il ne faut pas oublier que l'origine du hasard est communément attribuée à l'ignorance. Or la grande révolution du chaos est d'introduire précisément des comportements aléatoires* qui ne doivent rien à l'ignorance.

Le chaos se produit lorsque les équations différentielles* d'un système dynamique ne sont pas intégrables*. Ceci a une signification profonde, car l'intégrabilité signifie que les solutions des équations sont représentables par des fonctions ordinaires ou spéciales, soit par des objets mathématiques imposant une corrélation* rigoureuse entre leurs parties. Cette solidarité des parties de l'objet fait que lorsque l'on parcourt l'objet on ne rencontre à vrai dire rien de nouveau, rien qui ne soit pas prédictible*. Dans le cas de non intégrabilité, des objets disloqués peuvent s'introduire, des objets dont les corrélations entre différentes parties peuvent s'effondrer.

C'est le mérite de Jean Bass d'avoir donné à ce problème de non intégrabilité une solution conforme aux traditions de la théorie des équations différentielles. Lorsque l'on ne trouve pas de solution dans une classe de fonctions on cherche à définir une nouvelle classe d'objets mathématiques solution des équations. C'est ce qui a brillamment réussi par l'introduction des distributions* en d'autres circonstances. C'est ce qui se produit ici par la définition au sein des fonctions stationnaires*, de deux classes, les fonctions habituelles et les fonctions pseudo aléatoires*. Ces dernières se distinguent des précédentes par le fait que leur fonction d'auto corrélation tend vers zéro lorsque l'intervalle de temps tend vers l'infini, ce qui équivaut à ce que leur spectre soit totalement continu. Une classe de fonctions qui « perdent la mémoire », qui ne sont pas localement irrégulière mais le sont globalement. Cette perte de mémoire explique leur grande sensibilité aux conditions initiales qui est considérée là comme un effet et non pas comme une cause. En tout état de cause « des solutions turbulentes » à l'équation de Navier Stokes*.

Leur définition même rend les notions de fonctions pseudo aléatoires et de trajectoires mélangeantes* équivalentes. Toute la difficulté réside alors dans la démonstration que de tels objets sont effectivement solution de certaines équations différentielles ce qui

instaure le chaos déterministe. C'est ce qui fait l'importance de la démonstration de Sinai* du caractère mélangeant du billard plan.

Une autre caractérisation de ce caractère pseudo aléatoire ou chaotique utilise la notion de production de nouveauté au cours du mouvement, mesurée par une entropie : l'entropie de Kolmogorov-Sinai*. Les fonctions ordinaires sont cohérentes et ordonnées, rien de nouveau, de non prédictible* ne se produit. Cette entropie est nulle. La décorrélation des fonctions pseudo aléatoires introduit du nouveau au sens propre, soit du non prédictible. L'entropie est non nulle.

Le fait que le phénomène de chaos corresponde à l'élargissement de la classe de fonctions solutions d'une équation différentielle déterministe, montre bien que l'on n'introduit rien qui ne soit pas déterministe. Même si le chaos a des aspects aléatoires, ce n'est pas le hasard*, qui reste un concept à part. A moins de montrer qu'un phénomène d'aspect aléatoire est un phénomène chaotique, comme c'est le cas pour le lancer du dé ou les trajectoires des boules de billard, l'aléatoire garde son privilège de non déterminisme et se décrit au moyen de la théorie des processus stochastiques*. Une équation différentielle stochastique* n'est pas une équation différentielle ordinaire.

L'existence du chaos déterministe, véritable sosie du hasard*, rend le hasard un peu suspect. Et si derrière le hasard se cachait le chaos. Un véritable problème de « variables cachées ». C'est bien souvent le cas. Le hasard perd alors son caractère d'ignorance. Le hasard vrai reste alors celui pour lequel on ne trouve pas de chaos sous jacent ou quelque chose d'autre qui n'est pas encore découvert. C'est peut être le cas du hasard en mécanique quantique.

Reste encore à savoir comment concilier le chaos déterministe avec la notion de liberté*. Question que se posait déjà Joseph Boussinesq dès 1878 dans son ouvrage « Conciliation du véritable déterminisme mécanique avec l'existence de la vie et de la liberté morale.

DYNAMIQUE NON LINEAIRE ET CHAOS EN BIOLOGIE

De nombreuses conditions expérimentales donnent accès à la dynamique de phénomènes biologiques. La nécessité de modélisation de ces phénomènes entraîne le recours à la théorie des systèmes dynamiques* et manifeste la présence de dynamiques non linéaires* et de chaos déterministe*. Les comportements non linéaires apparaissent dans l'auto-organisation*, dans les oscillateurs* et leur

synchronisation* (Cf. Rythmes biologiques*) ou dans les phénomènes d'amplification*.

En biologie, les réseaux de régulation génétique constituent des ensembles complexes de choix. Si le séquençage du génome* est désormais une réalité, il ne suffit pas à comprendre le fonctionnement du vivant. En effet, les gènes ne sont pas des objets statiques : leurs activités sont fortement couplées et varient au cours du temps en fonction des interactions croisées et de l'environnement. La carte des interactions moléculaires* liée à une fonction donnée est d'une grande complexité ; pourtant, de nombreux travaux basés sur des modèles dynamiques simples laissent espérer que l'on puisse isoler de petits modules mettant en jeu quelques gènes et protéines en interaction mutuelle, et comprendre ainsi le fonctionnement du système original à partir du couplage de ces modules. L'étude de ces ensembles complexes fait souvent apparaître des blocs élémentaires constitués de bascules réalisées par des dispositifs bistables, d'auto-oscillateurs* conçus autour de boucles de rétroaction négative, et de cascades de signalisation qui propagent de l'information entre modules différents, qui ont tous des réponses fortement non linéaires. Comprendre comment ces modules fonctionnent et communiquent de manière à assurer efficacement et robustement des fonctions biologiques est d'une importance cruciale, car les réseaux de régulation contrôlent le destin des cellules et sous-tendent des phénomènes biologiques majeurs. Le cycle de division cellulaire, dont la compréhension est essentielle aussi bien dans ses aspects normaux (développement) qu'anormaux (cancer), l'horloge circadienne qui rythme un grand nombre de processus à l'échelle de 24 heures, l'horloge somitique qui égrène la formation des vertèbres sont ainsi des exemples classiques d'oscillateurs génétiques. Les phénomènes de bistabilité sont quant à eux mis à profit par la cellule pour réaliser des mémoires cellulaires ou des « checkpoints » au-delà desquels aucun retour en arrière n'est possible (division cellulaire, mort cellulaire programmée).

La dynamique non linéaire* s'accompagne souvent de chaos.

Une étape dans l'histoire de la notion de chaos a été la publication par le physicien et écologiste Robert M. May, en 1972, d'un article intitulé "Simple mathematical models with very complicated dynamics". Cet article, sans doute l'un des plus cités lorsqu'il est question de chaos, présente un modèle très simple d'évolution du nombre d'individus d'une population, volontairement le plus simple qu'on puisse imaginer pour décrire la dynamique d'une population. Ce modèle est appelé « application logistique », par

référence à « l'équation logistique » introduite par le belge Pierre-François Verhulst en 1846.

May étudia donc cette évolution pour différents paramètres et obtint une richesse de comportements de dynamique des populations à l'époque insoupçonnée, certains présentant une « apparence erratique et imprédictible à long terme », et aujourd'hui qualifiés de « chaotiques ». Cet article de May inspira de nombreux travaux, portant entre autres sur les variations cycliques ou chaotiques de populations de pucerons, de sauterelles, de lemmings, de sardines, ou encore de systèmes prédateur-proie (le choix des espèces étudiées est déterminé soit par l'occurrence de phénomènes remarquables, comme les invasions de sauterelles ou les « suicides collectifs » de lemmings, soit par la présence de données fiables et précises sur une longue durée, typiquement plus d'un siècle, fournis par les registres des criées aux poissons, ou ceux des peausseries pour divers couples prédateur-proie, comme les lynx et les lièvres). Mais l'étude du chaos en biologie ne se limite pas à la dynamique des populations, et d'autres domaines d'investigation sont : – l'épidémiologie de certaines maladies infectieuses (rougeole, grippe¹) ; – le rythme cardiaque ; – les neurosciences, tant à l'échelle neuronale (enregistrement de l'activité électrique d'un neurone) qu'à l'échelle cérébrale (activité enregistrée par électroencéphalogramme) ; – le métabolisme et les rythmes intracellulaires, observés au niveau de concentrations de certaines molécules (glucose, hormones, ions calcium ou potassium, ...). Ils illustrent et prolongent *in vivo* les comportements chaotiques manifestés par certaines réactions chimiques.

Inspirées par la théorie du chaos*, de nombreuses études se sont penchées sur les éventuelles caractéristiques chaotiques du rythme cardiaque, tel qu'on l'observe par électrocardiogramme. On a comparé les résultats obtenus chez des sujets sains avec ceux de sujets atteints de pathologies cardiaques. La conclusion (il y faudrait bien sûr plus de nuances) est que le rythme cardiaque sain présente une composante chaotique alors que les rythmes très réguliers sont associés à des pathologies. L'explication vient de ce qu'un rythme cardiaque exactement périodique serait peu robuste : la moindre perturbation entraînerait une désynchronisation entre le rythme cardiaque et le rythme respiratoire. Qu'en est-il pour un régime chaotique ? La sensibilité aux conditions initiales des systèmes chaotiques, responsable de leur imprédictibilité à long terme, peut aussi apparaître comme un avantage exploitable au sens où une très faible influence extérieure peut suffire à modifier amplement le comportement. Cette constatation a mené à l'idée du contrôle d'une dynamique chaotique à

l'aide de perturbations extérieures soigneusement choisies. Dans les systèmes vivants, les mécanismes de régulation réalisant ce contrôle ont pu se mettre en place au cours de l'évolution, par sélection naturelle. Il semble donc que le rythme cardiaque illustre cette possibilité de stabiliser un régime chaotique sur une trajectoire approximativement périodique, tout en gardant « en réserve » toute la sensibilité et la richesse de la dynamique chaotique pour mieux réagir aux perturbations et s'adapter plus rapidement aux changements extérieurs. La diminution du caractère chaotique du rythme cardiaque est ainsi un signe clinique inquiétant, indiquant un risque de moindre adaptabilité et de moindre robustesse. Cependant, on voit là un exemple des nuances à apporter quand on parle de chaos en biologie: ce seront souvent des versions plus sophistiquées ou hybrides de dynamiques chaotiques qui seront rencontrées.

Des comportements chaotiques bien avérés ont été observés au niveau des axones de neurones isolés ayant un rôle de « pacemakers » ou appartenant à de petits réseaux fonctionnels bien identifiés, par exemple les générateurs centraux de rythme* impliqués dans des activités motrices. On observe aussi des comportements intermittents. À l'échelle des réseaux de neurones, de remarquables expériences ont été réalisées, où des neurones réels ont été couplés à des neurones électroniques artificiels, donc parfaitement contrôlables et réglables. On a pu ainsi étudier les modifications du comportement d'un neurone réel en fonction des influences qu'il reçoit de ses voisins. Un point essentiel que cette étude a clairement mis en évidence est que les potentialités dynamiques d'un neurone sont profondément affectées par son insertion dans un réseau, et des régimes dynamiques (oscillations, trains de décharges) peuvent alors être observés pour le neurone alors qu'ils ne le sont pas pour le neurone isolé. À l'inverse, l'insertion dans un réseau d'un neurone, chaotique lorsqu'il est isolé, peut le stabiliser et éliminer tout comportement irrégulier. On trouve ici un avantage sélectif du chaos : partir de neurones dont le « régime de base » est un régime chaotique donne une grande souplesse dans la mise en place d'un réseau fonctionnel, puisqu'un neurone chaotique peut potentiellement être stabilisé dans un grand nombre de régimes.

Bien que les méthodes d'acquisition se ressemblent, l'analyse de l'électroencéphalogramme est beaucoup plus compliquée que celle de l'électrocardiogramme. La raison principale est que le cerveau, à la différence du cœur, n'a pas un fonctionnement globalement synchronisé. Ce qu'il est possible de prouver, c'est la présence de composantes déterministes non linéaires dans l'électroencéphalogramme. Les conclusions ne sont cependant pas

claires et unanimes, de plus affaiblies par les hypothèses exigées par les méthodes d'analyse. La question du chaos dans la dynamique cérébrale est donc encore très ouverte et activement étudiée par de nombreuses équipes.

DYNAMIQUE SYMBOLIQUE

Méthode d'étude d'un système dynamique* par partition de l'espace de phase en un certain nombre de régions et en décrivant l'évolution comme passage d'une région à l'autre. Si l'on associe à chaque région un symbole, on peut associer à chaque trajectoire une suite de symboles, d'où le nom de "dynamique symbolique". C'est en quelque sorte l'étude d'un système dynamique par échantillonnage.

EAU

ECHANGE (Cf. Energie d'échange*)

ECHANTILLONNAGE

ECHELLE

ECOLOGIE

ECONOMIE (Cf. Optimalité)

EFFECTIVE (Théorie)

EFFETS QUANTIQUES MACROSCOPIQUES

EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN (Paradoxe EPR)

Le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) est issu d'une expérience de pensée publiée en 1935 par Albert Einstein*, Boris Podolsky et Nathan Rosen, dans un article sobre et court, qui a marqué la discussion sur l'interprétation* de la mécanique quantique* pour toute la fin du siècle. Il s'agissait de réfuter l'interprétation de Copenhague* de la physique quantique, en montrant la nécessité de

l'existence d'attributs* (éléments de réalité) microphysiques préalables à toute observation. C'est contester l'aspect définitif de boîte noire* de la stratégie quantique, et chercher à ouvrir cette boîte noire, en introduisant des variables cachées* locales. Le paradoxe EPR ne contestait pas la validité de la mécanique quantique, mais seulement son incomplétude.

Le paradoxe EPR s'appuie sur les propriétés paradoxales de l'enchevêtrement*. Celui-ci prévoit des corrélations à grande distance entre particules ayant auparavant formé un système unique, ce qui semblerait indiquer l'existence de certaines propriétés individuelles des particules (attributs*, variables cachées*). Les inégalités de Bell* ont permis de montrer que le caractère des corrélations quantiques* était incompatible avec une telle hypothèse.

La conclusion de l'argument EPR, basée sur l'hypothèse du réalisme local*, qui admet que des particules infiniment éloignées sont indépendantes, révélait une contradiction entre ce réalisme et la complétude de la mécanique quantique. EPR partait de l'idée régnante à l'époque de la validité générale du réalisme local, pour conclure que la mécanique quantique était incomplète. Il a fallu longtemps pour admettre que l'objet quantique n'avait pas d'attributs ordinaires

ELASTICITE

ELECTRODYNAMIQUE DE MAXWELL

Théorie physique des phénomènes électromagnétiques (Cf. Electromagnétisme*) dans lesquels le rôle principal est joué par l'interaction entre les particules chargées ou les particules possédant un moment magnétique, qui s'effectue par l'intermédiaire du champ* électromagnétique. Cette théorie est fondée sur les équations de Maxwell* qui caractérisent l'intensité du champ électrique* et celle de l'induction magnétique.

ELECTRODYNAMIQUE DE WEBER (comparée à l'électrodynamique de Maxwell)

Dans l'électrodynamique de Wilhelm Weber (1804-1891) développée pendant la même période que l'électrodynamique de Maxwell*, la force d'interaction directe entre deux charges ne dépend pas simplement de la distance, mais de la vitesse et de l'accélération relatives des charges. C'est une théorie où les charges agissent à distance et non pas par l'intermédiaire d'un champ* comme chez Maxwell qui n'envisage pas l'interaction directe des charges entre

elles. Maxwell croyait en l'existence d'un milieu matériel remplissant tout l'espace, l'éther, qui assure la transmission des forces.

On a là un bel exemple de deux théories très différentes qui vérifient les mêmes résultats expérimentaux. Aucun fait expérimental n'a permis jusqu'à présent de les distinguer. Bel exemple de sous-détermination des théories par les faits (Thèse de Duhem-Quine*).

ELECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

Théorie quantique du champ électromagnétique et de ses interactions avec la matière. Premier exemple historique d'une théorie quantique de champ*. La quantification du champ électromagnétique fait apparaître le concept de quanta* du champ: le photon*. L'état fondamental du champ électromagnétique quantique est un état à zéro photon, l'état de vide quantique* du champ.

En suivant Dirac, à chaque mode* classique du champ de rayonnement nous associons un simple oscillateur harmonique quantique*, c'est là l'essence de la théorie quantique du rayonnement. Cet oscillateur ne peut se trouver que dans un ensemble discret d'états séparés par des quanta* d'énergie. Ainsi l'électrodynamique quantique utilise le schéma de la théorie classique du champ électromagnétique où figurent les notions de lagrangien* et d'hamiltonien* et a recours à des principes variationnels*. Mais les oscillateurs harmoniques de cette théorie sont des oscillateurs harmoniques virtuels (Cf. Fourier-représentation de*). La mathématique impose ses représentations à la physique ! Ce qui peut paraître de simples jongleries mathématiques acquiert un statut explicatif dans une théorie physique.

L'électrodynamique quantique est une théorie à nombre variable de quanta et a recours aux méthodes de la seconde quantification*.

Une conséquence intéressante de la quantification du rayonnement se trouve dans les fluctuations associées à l'énergie de point zéro dites fluctuations du vide*. Ces fluctuations n'ont pas d'analogue classique et sont responsables de nombreux phénomènes intéressants en optique quantique*.... qui sont cependant souvent explicables par une théorie semi classique où la matière est quantifiée mais le rayonnement est traité de manière classique en lui adjoignant un champ fluctuant classique calqué sur le champ du vide quantique (Cf. Electrodynamique stochastique*).

La quantification du champ de rayonnement est nécessaire pour expliquer des effets comme l'émission spontanée*, le déplacement de

Lamb*, la largeur de raie du laser, l'effet Casimir* et la statistique complète des photons dans le laser. En fait chacun de ces effets physiques peut être compris du point de vue des fluctuations du vide* qui perturbent les atomes ; ainsi par exemple l'émission spontanée* est souvent présentée comme le résultat d'une stimulation de l'atome par les fluctuations du vide*. Aussi pressantes soient ces raisons, il en existe bien d'autres ainsi que des arguments logiques pour quantifier le champ de rayonnement.....Ainsi en est il avec l'observation expérimentale d'états non classiques du champ de rayonnement comme les états comprimés, la statistique sub-poissonienne des photons et le phénomène d'anti groupement photonique.

ELECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE DANS UNE CAVITE

Le champ électromagnétique classique dans une cavité est modifié par l'existence des parois. Les modes* classiques du champ présents peuvent être sélectionnés, ce qui a pour effet de modifier l'état de vide quantique, étant donnée la procédure de quantification du champ.

Ainsi entre deux plaques conductrices certains modes du champ classique peuvent être absents, le champ de vide entre les plaques est différent du champ de vide en dehors des plaques, ce qui se traduit par une attraction des plaques entre elles, observée expérimentalement, l'effet Casimir*.

L'absence dans le vide quantique dans une cavité, des modes correspondant à la fréquence de désexcitation d'un atome excité, peut engendrer une modification de l'émission spontanée* voire son inhibition totale.

Une expérience récente utilise une cavité pour piéger un état à un photon.Elle est formée de deux miroirs se faisant face à 2,7 cm de distance.Il s'agit de parois supraconductrices refroidies à une température inférieure à un degré absolu,et dont la surface est polie à quelques nanomètres près.L'apparition d'un état* à un photon dans la boîte est dû au rayonnement thermique résiduel de ses parois.Dans cette cavité l'onde électromagnétique parcourt en moyenne entre les miroirs un trajet égal à la circonférence terrestre avant de disparaître absorbée par les parois, établissant ainsi un record de longévité pour de la lumière piégée.

Pour observer l'état à un photon, on envoie un à un à travers la cavité des atomes de rubidium dans un état excité de Rydberg*. On observe une raie d'absorption à une fréquence différente de celle du

photon. La présence d'un champ électromagnétique quantifié modifie légèrement la fréquence de la transition atomique. Ce déplacement est mesuré par une méthode de spectroscopie atomique très sensible. On réalise ainsi une mesure quantique non destructive* de l'état du champ, permettant de savoir le nombre de photons présents dans la cavité et de suivre la vie et la mort d'un état à un photon en direct.

Ces travaux ont valu à Serge Haroche le prix Nobel de physique 2012. Leur médiatisation a, pour éviter les arcanes de l'électrodynamique quantique, fait largement usage du mot photon suggérant par là une particule localisée, ce qui est totalement étranger à ces expériences. En M.Q. seul l'état représente l'objet quantique*. Les déviations ontologiques ne sont pas autorisées.

ELECTRODYNAMIQUE STOCHASTIQUE

ELECTROFAIBLE (THEORIE ou INTERACTION))

L'interaction électrofaible, aussi appelée force électrofaible, est la description unifiée de deux des quatre interactions fondamentales de l'univers, à savoir l'électromagnétisme* (appelé électrodynamique quantique* dans sa version quantique) et l'interaction faible*. Cette description se fait en utilisant le langage de la théorie des champs de jauge*. A faible échelle elle introduit quatre champs vectoriels sans masse équivalents. A grande échelle cette symétrie subit une brisure spontanée* où trois de ces champs acquièrent une masse. Ces champs décrivent les bosons intermédiaires* W^+ , W^- et Z . Le quatrième champ reste sans masse et s'avère identique au champ électromagnétique associé au photon.

La théorie électrofaible a été vérifiée par la découverte des bosons intermédiaires en 1983 au CERN. L'origine de la masse demeure mystérieuse. Pour l'expliquer on a introduit le champ de Higgs*.

ELECTROMAGNETISME

Le concept de champ électromagnétique a été forgé au XIX^e siècle pour décrire de manière unifiée les phénomènes électriques et magnétiques. Des phénomènes tels que l'induction électromagnétique* montrent en effet que les champs électrique et

magnétique sont liés: un champ magnétique variable engendre un champ électrique, un champ électrique variable est source d'un champ magnétique. Une réciprocité admirablement traduite par les équations de Maxwell. Un champ électromagnétique agit sur une charge électrique par la force de Lorentz*.

ELECTRON

L'électron est une particule élémentaire exprimant l'atomisme* de l'électricité.

ELEMENTARISME

ELIMINATIVISME

EMERGENCE

L'émergence c'est la création de nouveauté.

C'est la démarche inverse de la réduction, du niveau* inférieur au niveau* supérieur. C'est la faillite du réductionnisme*.

La réduction d'un système en éléments premiers n'est pas nécessairement souhaitable ni même toujours pratiquement réalisable. Les propriétés signifiantes des systèmes complexes se manifestent à des niveaux* variés de l'organisation de ces systèmes. Les propriétés d'un niveau donné ont la plupart du temps un caractère d'émergence par rapport au niveau sous jacent, ce qui signifie qu'elles n'apparaissent pas du tout dans ce niveau inférieur et nécessitent pour leur explication le passage explicite du niveau inférieur au niveau supérieur, ce qui implique une définition interne du niveau supérieur. Le choix d'un autre niveau naturel n'apparaît pas clairement à l'intérieur d'un niveau donné.

L'émergence marque une difficulté à rendre compte des origines*, en particulier dans une situation typique où le tout n'est pas égal à la somme des parties*. Elle marque l'irréductibilité de l'explication d'un phénomène à ses parties composantes.

La difficulté philosophique est alors d'élaborer une épistémologie correcte de *l'émergence*. Pour qu'il y ait émergence, il faut (au moins) deux niveaux différents d'organisation (l'un "micro" sous-jacent, l'autre "macro" épiphénoménal) qui soient observables à des échelles spatio-temporelles très différentes. Il faut en outre qu'il existe:

(i) au niveau sous-jacent, des phénomènes collectifs-coopératifs, distribués et complexes, permettant d'expliquer *causalement* la

formation d'états organisationnels globalement cohérents (et en particulier de patterns spatio-temporels morphologiquement structurés),

(ii) au niveau supérieur, des *invariants* (invariants au sens d'être indépendants de la structure fine du niveau inférieur) montrant qu'il existe une *autonomie* de la syntaxe organisationnelle de ce niveau.

Toute émergence est donc causalement réductible au niveau inférieur (i.e. épiphénoménale) tout en étant structurellement et fonctionnellement autonome.

Cette notion apparue dans la littérature philosophique, en particulier à propos de la non réductibilité au mécanisme* des phénomènes vitaux ou psychiques, a connu un renouveau d'intérêt avec la discussion contemporaine sur les systèmes complexes. Les émergentistes cherchaient à occuper une position intermédiaire entre les vitalistes*, partisans de la force vitale, et les physicalistes, réductionnistes extrêmes.

Le concept d'émergence a une longue histoire. Il a été soutenu par des matérialistes comme Marx* et Engels*, des positivistes* comme Comte*, des dualistes* et des non dualistes. L'émergence était l'aspect le plus caractéristique de la philosophie de Claude Bernard*. Pour Engels* l'émergence de propriétés nouvelles et irréductibles dans la nature était considérée comme une manifestation du caractère dialectique* propre aux transformations de la matière, fondement du matérialisme dialectique*.

L'émergence peut être purement épistémologique*, c'est à dire liée à notre incapacité de décrire complètement des systèmes complexes. Les différentes limitations caractéristiques de la mécanique quantique obligent à considérer de nombreux phénomènes quantiques comme émergents. Ainsi en est-il de la création de particules.

L'émergence peut aussi avoir un caractère ontologique*. C'est le cas de l'apparition du chaos déterministe* ou de l'apparition de formes dans les phénomènes d'auto-organisation*.

L'émergence est en fait une discontinuité qualitative associée dans les systèmes dynamiques* à la présence de bifurcations*. C'est là l'idée directrice de l'œuvre de Boussinesq* pour tenter de concilier le déterminisme* et le libre arbitre*.

L'émergence est un mot exprimant l'autonomie de l'état d'un niveau* supérieur dans un système complexe, en fait l'existence même de ce niveau avec les causes descendantes* qui le caractérisent.

EMERGENCE EN PHYSIQUE

Jusqu'à récemment les physiciens pensaient que tous les phénomènes de la physique étaient réductibles et explicables en termes de comportement des particules et des champs. La physique constituant un des programmes réductionnistes* les plus accomplis de la science.

Cette vision s'est modifiée à la suite de l'article « More is different » du physicien des solides Philip Anderson en 1972. Il y affirmait que les entités macroscopiques sont très différentes de la somme de leurs parties microscopiques constituantes. De nouvelles propriétés apparaissent au niveau macroscopique, inexplicables en termes des parties microscopiques. Si le monde naturel est constitué à partir de faits et de lois élémentaires, cela ne veut pas dire que l'on est capable de reconstruire le monde à partir d'elles. Des problèmes liés à l'échelle* et à la complexité* s'y opposent. La psychologie* n'est pas de la biologie* appliquée. La biologie* n'est pas de la chimie* appliquée. Le comportement asymétrique de la molécule d'ammoniac n'est pas explicable par le comportement quantique symétrique de ses atomes constituants.

L'émergence comme voie intermédiaire d'explication entre le réductionnisme* et le dualisme* est admis depuis longtemps en psychologie, mais la nouveauté est dans l'appel à l'émergence pour l'apparition de l'ordre dans les systèmes dynamiques*, en particulier chaotiques* ou auto-organisés*. L'arc en ciel ne relève pas de l'optique ondulatoire* mais de la théorie des catastrophes*.

La mécanique quantique offre un cas flagrant d'émergence dans la mesure où l'on ne sait pas offrir une explication de l'existence d'un monde classique à partir du monde quantique (Cf. Limite classique de la mécanique quantique*). L'interprétation de Copenhague* de la M.Q. suppose même une séparation fondamentale entre le monde macroscopique et le monde microscopique. Ceci rend le monde classique émergent car il est inexplicable en termes quantiques. Position battue en brèche par des théories comme celles de la décohérence*.

L'émergence est une considération de caractère épistémique* sujette à évolution et n'a aucun caractère ontologique*.

EMERGENTISME

L'émergentisme prend le contrepied du réductionnisme* et du physicalisme* en proclamant que les propriétés du tout ne sont pas prédictibles à partir des propriétés des parties*, tout en se distinguant d'un holisme* radical. A moins de s'appuyer sur l'étude de

changements qualitatifs comme les bifurcations*, l'émergentisme reste une doctrine vague de par son recours à la notion de complexité*.

EMISSION INDUITE ou STIMULEE

Lumière émise par un système atomique ou moléculaire se trouvant dans un état excité, par suite de l'action du rayonnement excitateur lui-même. Cette lumière se distingue de celle émise "spontanément" par le même système excité, en l'absence du rayonnement excitateur. L'émission stimulée, découverte par Einstein en 1916, est à la base de la réalisation des masers* et des lasers*.

EMISSION SPONTANEE

Un système quantique, atome ou molécule, peut, par absorption d'énergie lumineuse ou thermique, passer dans un état excité. Cet état se désexcite "spontanément" avec réémission de lumière au bout d'un temps plus ou moins long (fluorescence ou phosphorescence) . C'est le mécanisme de production de lumière universellement utilisé.

En fait, l'émission n'est pas aussi spontanée qu'il y paraît et nécessite une action du champ électromagnétique sur le système. En mécanique quantique l'état excité* est un état stationnaire propre* totalement stable. Seule l'électrodynamique quantique* explique le phénomène, car le champ électromagnétique a un état fondamental*, l'état de vide quantique*, et interagit avec le système quantique, ce qui a pour effet de faire perdre à l'état excité son caractère d'état propre pour le système total. Il s'ensuit une transition où le système quantique initial revient à l'état fondamental et où le champ électromagnétique passe de l'état de vide à un état excité à un photon.

On a voulu voir dans ce couplage entre état excité et état de vide l'action directe du champ électromagnétique fluctuant du Vide*, prouvant par là même son existence physique. En fait cela donne lieu à une discussion complexe sur les rôles respectifs des fluctuations du vide* et de la réaction de rayonnement* sous son aspect dissipatif*. Les deux contributions existent simultanément même si l'on peut mener les calculs de façon à ne faire intervenir que l'une à l'exclusion de l'autre. Cette pluralité des rôles pourrait s'interpréter intuitivement comme si les fluctuations du vide déclenchaient l'émission spontanée et la réaction de rayonnement lui permettait de se développer.

Le terme d'émission spontanée, quoique impropre est conservé pour marquer l'opposition avec l'émission induite* utilisée dans le laser*.

EMPIRIOCRITICISME

Nom donné à la doctrine de philosophie de la connaissance d'Ernst Mach* (Cf. Machisme*)

EMPIRISME

Position épistémologique affirmant que toute la connaissance ne provient que de l'expérience ou de l'observation. Attitude opposée au rationalisme*. Les axiomes, les hypothèses et les principes généraux ne sont pas utiles pour la connaissance. La théorie s'établit à partir des faits expérimentaux par induction*.

C'est le programme scientifique de Newton, appuyé par la philosophie de Locke*, Hume* et Berkeley* en Angleterre. Attitude opposée à celle des rationalistes* continentaux, Descartes*, Spinoza* et Leibniz*.

On doit cependant remarquer que c'est Descartes, lui-même qui est le point de départ de ces deux courants de pensée. Comme le dit Husserl* deux lignes de développement partent de Descartes. L'une d'entre elles, la ligne du rationalisme, nous conduit par Malebranche*, Spinoza* et Leibniz*, jusqu'à Kant*, le point de rebroussement. Ce qui règne ici est la conviction qu'il est possible de réaliser une connaissance* universelle absolument fondée du monde more geometrico. C'est précisément contre cette conviction, contre une telle portée de la nouvelle science, c.a.d. contre sa prétention à atteindre un transcendant* et finalement contre ce transcendant lui-même, que réagit l'empirisme anglais. D'où la critique de l'entendement de Locke*, théorie de la connaissance* naturaliste, et ses développements immédiats chez Berkeley* et chez Hume*.

Le solipsisme* est une forme extrême d'empirisme.

EMPIRISME LOGIQUE ou Positivisme logique.

Mouvement philosophique né au début du XXème siècle à Vienne et représentant une version contemporaine de l'empirisme*. Son programme consiste essentiellement dans une défense de l'empirisme par l'analyse logique. La signification de toute proposition est dans l'expérience qui rend cette proposition vraie. Cette

signification doit être vérifiée par la logique. Les théories métaphysiques sont sans signification.

L'idéal du positivisme logique est dans une connaissance physique constituée par un ensemble de propositions logiquement et mathématiquement consistantes et directement vérifiables par l'expérience.

Le positivisme logique représente une forme extrême de l'empirisme* et du positivisme*. Mais son programme, trop lié à une conception axiomatique des théories physiques et à une analyse linguistique, perd beaucoup de son crédit dans les années 50-60. Les positivistes logiques furent en effet incapables de donner des critères permettant de distinguer entre les observables* et les non-observables*, et il apparût clairement que des entités théoriques* comme l'électron, le spin... ne pouvaient être traduites dans un langage strictement empirique sans perdre leur signification.

Cette conception internaliste de la Science a été critiquée par les représentants de l'analyse historique (externalistes)- Popper*, Quine*, Koyré*, Kuhn*, Feyerabend*, Toulmin*. Mais elle n'a pas cessé d'exister et il se trouve toujours des philosophes des sciences pour défendre les méthodes formelles comme outil fondamental de l'analyse philosophique des théories scientifiques.

ENCHEVÊTREMENT (En anglais : entanglement. Dans le jargon scientifique : intrication) (Non séparabilité)

Situation physique d'un système quantique qui se trouve dans un état enchevêtré*. Situation qui découle du principe d'indiscernabilité* et de la symétrisation des états* qu'il impose.

Propriété de la matière qui lie deux (ou plus) objets quantiques différents quelle que soit la distance qui les sépare. Les éléments d'un ensemble enchevêtré n'ont plus d'états quantiques propres. Seul le groupe considéré comme un tout a un état bien défini. En conséquence, dès que l'on effectue une mesure sur un des objets, on obtient des informations sur son partenaire enchevêtré.

La confirmation physique de l'existence de l'enchevêtrement en particulier par l'expérience d'Aspect (1982) a eu pour conséquence de nombreuses applications dans le domaine de l'information quantique*, comme la cryptographie quantique*, la téléportation quantique* ou l'ordinateur quantique*. Mais l'enchevêtrement, en faisant apparaître une énergie d'échange*, était déjà au cœur de l'identité des atomes*, des molécules* et des solides* et constitue un enjeu majeur des calculs de la chimie quantique*.

Les corrélations quantiques* prédites et observées pour les états enchevêtrés sont un des thèmes majeurs des discussions sur l'interprétation* de la mécanique quantique. Ces corrélations sont sans aucun doute l'apport le plus important de la mécanique quantique à l'image physique du monde*. Elles empêchent de considérer le monde comme un ensemble de parties séparées, ce qui a des conséquences scientifiques et philosophiques profondes.

Il est tentant de vouloir produire un modèle physique du monde microphysique sous jacent, distinct de la M.Q., pour expliquer la corrélation de l'enchevêtrement. Un tel modèle a été construit par David Bohm* en s'inspirant de l'holographie. Un modèle du monde où les objets séparés n'existent pas.

ENCYCLOPEDIE (de Diderot* et d'Alembert*)

Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, publié par Diderot* et d'Alembert* entre 1751 et 1765. Un des ouvrages majeurs du siècle des Lumières*.

Dans le Discours préliminaire, texte admirable écrit par d'Alembert, sont annoncées certaines idées forces de philosophie naturelle*. En particulier sur la théorie de la connaissance* :

« On peut diviser toutes nos connoissances en directes et en réfléchies. Les directes sont celles que nous recevons immédiatement sans aucune opération de notre volonté; qui trouvant ouvertes, si on peut parler ainsi, toutes les portes de notre ame, y entrent sans résistance et sans effort. Les connoissances réfléchies sont celles que l'esprit acquiert en opérant sur les directes, en les unissant et en les combinant.

Toutes nos connoissances directes se réduisent à celles que nous recevons par les sens; d'où il s'ensuit que c'est à nos sensations que nous devons toutes nos idées.

Ce principe des premiers philosophes a été long-tems regardé comme un axiome par les scholastiques; pour qu'ils lui fissent cet honneur, il suffisoit qu'il fût ancien, et ils auroient défendu avec la même chaleur les formes substantielles ou les qualités occultes. Aussi cette vérité fut-elle traitée à la renaissance de la philosophie, comme les opinions absurdes dont on auroit dû la distinguer; on la proscrivit avec elles, parce que rien n'est si dangereux pour le vrai, et ne l'expose tant à être méconnu, que l'alliage ou le voisinage de l'erreur.

Le système des idées innées, séduisant à plusieurs égards, et plus frappant peut-être, parce qu'il étoit moins connu, a succédé à l'axiome

des scholastiques; et après avoir long-tems régné, il conserve encore quelques partisans; tant la vérité a de peine à reprendre sa place, quand les préjugés ou le sophisme l'en ont chassée.

Enfin depuis assez peu de tems on convient presque généralement que les anciens avoient raison; et ce n'est pas la seule question sur laquelle nous commençons à nous rapprocher d'eux.

Rien n'est plus incontestable que l'existence de nos sensations; ainsi pour prouver qu'elles sont le principe de toutes nos connoissances, il suffit de démontrer qu'elles peuvent l'être: car en bonne philosophie, toute déduction qui a pour base des faits ou des vérités reconnues, est préférable à ce qui n'est appuyé que sur des hypothèses, même ingénieuses.

Pourquoi supposer que nous ayons d'avance des notions purement intellectuelles, si nous n'avons besoin pour les former, que de réfléchir sur nos sensations? Le détail où nous allons entrer fera voir que ces notions n'ont point en effet d'autre origine.

La première chose que nos sensations nous apprennent, et qui même n'en est pas distinguée, c'est notre existence; d'où il s'ensuit que nos premières idées réfléchies doivent tomber sur nous, c'est-à-dire, sur ce principe pensant qui constitue notre nature, et qui n'est point différent de nous-mêmes.

La seconde connoissance que nous devons à nos sensations, est l'existence des objets extérieurs, parmi lesquels notre propre corps doit être compris, puisqu'il nous est, pour ainsi dire, extérieur, même avant que nous ayons démêlé la nature du principe qui pense en nous. »

Il se prononce ensuite sur la matière et l'espace :

« Dans cette étude que nous faisons de la nature, en partie par nécessité, en partie par amusement, nous remarquons que les corps ont un grand nombre de propriétés, mais tellement unies pour la plupart dans un même sujet, qu'afin de les étudier chacune plus à fond, nous sommes obligés de les considérer séparément.

Par cette opération de notre esprit, nous découvrons bientôt des propriétés qui paroissent appartenir à tous les corps, comme la faculté de se mouvoir ou de rester en repos, et celle de se communiquer du mouvement, sources des principaux changemens, que nous observons dans la nature. L'examen de ces propriétés, et sur-tout de la dernière, aidé par nos propres sens, nous fait bientôt découvrir une autre propriété dont elles dépendent; c'est l'impénétrabilité, ou cette espece de force par

laquelle chaque corps en exclut tout autre du lieu qu'il occupe, de maniere que deux corps rapprochés le plus qu'il est possible, ne peuvent jamais occuper un espace moindre que celui qu'ils remplissoient étant désunis.

L'impénétrabilité est la propriété principale par laquelle nous distinguons les corps des parties de l'espace indéfini où nous imaginons qu'ils sont placés; du moins c'est ainsi que nos sens nous font juger, et s'ils nous trompent sur ce point, c'est une erreur si métaphysique, que notre existence et notre conservation n'en ont rien à craindre, et que nous y revenons continuellement comme malgré nous par notre maniere ordinaire de concevoir.

Tout nous porte à regarder l'espace comme le lieu des corps, sinon réel, au moins supposé; c'est en effet par le secours des parties de cet espace considérées comme pénétrables et immobiles, que nous parvenons à nous former l'idée la plus nette que nous puissions avoir du mouvement.

Nous sommes donc comme naturellement contraints à distinguer, au moins par l'esprit, deux sortes d'étendue, dont l'une est impénétrable, et l'autre constitue le lieu des corps.

Ainsi quoique l'impénétrabilité entre nécessairement dans l'idée que nous nous formons des portions de la matiere, cependant comme c'est une propriété relative, c'est-à-dire, dont nous n'avons l'idée qu'en examinant deux corps ensemble, nous nous accoutûtons bientôt à la regarder comme distinguée de l'étendue, et à considérer celle-ci séparément de l'autre. Par cette nouvelle considération nous ne voyons plus les corps que comme des parties figurées et étendues de l'espace; point de vûe le plus général et le plus abstrait sous lequel nous puissions les envisager.

Car l'étendue où nous ne distinguerions point de parties figurées, ne seroit qu'un tableau lointain et obscur, où tout nous échapperoit, parce qu'il nous seroit impossible d'y rien discerner.

La couleur et la figure, propriétés toûjours attachées aux corps, quoique variables pour chacun d'eux, nous servent en quelque sorte à les détacher du fond de l'espace; l'une de ces deux propriétés est même suffisante à cet égard: aussi pour considérer les corps sous la forme la plus intellectuelle, nous préférons la figure à la couleur, soit parce que la figure nous est plus familiere étant à la fois connue par la vûe et par le toucher, soit parce qu'il est plus facile de considérer dans un corps la figure sans la couleur, que la couleur sans la figure; soit enfin parce que la figure sert à fixer plus aisément, et d'une maniere moins vague, les parties de l'espace. Nous voilà donc conduits à déterminer les propriétés de l'étendue simplement en tant que figurée.

C'est l'objet de la géométrie, qui pour y parvenir plus facilement,

considere d'abord l'étendue limitée par une seule dimension, ensuite par deux, et enfin sous les trois dimensions qui constituent l'essence du corps intelligible, c'est-à-dire, d'une portion de l'espace terminée en tout sens par des bornes intellectuelles ».

En 1751 parurent les deux premiers tomes de l'*Encyclopédie* dont Diderot a défini l'enjeu en des lignes à juste titre mémorables :

"Le but d'une encyclopédie est de rassembler les connaissances éparses sur la surface de la terre; d'en exposer le système général aux hommes avec qui nous vivons, et de le transmettre aux hommes qui viendront après nous; afin que les travaux des siècles passés n'aient pas été inutiles pour les siècles qui succéderont; que nos neveux devenant plus instruits, deviennent en même temps plus vertueux et plus heureux; et que nous ne mourions pas sans avoir bien mérité du genre humain".

L'*Encyclopédie* fut la plus grande entreprise éditoriale du temps en volume, en capital investi, en ouvriers employés. Edité par souscription, l'ouvrage connut un succès attesté par les multiples rééditions et contrefaçons qui accompagnèrent sa parution. En un siècle qui fut l'âge d'or des dictionnaires, il s'agissait au départ, en 1745, de procéder à la traduction augmentée du Dictionnaire universel anglais en 2 volumes, la *Cyclopaedia or an Universal dictionary of arts and sciences* d'Ephraim Chambers, paru à Londres en 1728 et souvent réédité. En 1747, deux jeunes gens de Lettres, Diderot et d'Alembert, à la notoriété alors modeste, encore que, pour Diderot, déjà sulfureuse, sont chargés de l'édition par les libraires parisiens associés, Le Breton, Durand, David et Briasson. L'ouvrage, prévu pour constituer dix volumes, atteindra, à son achèvement, 28 volumes - 17 de discours et 11 de planches - et aura demandé plus de 25 ans de travail.

Si l'accomplissement de "cet ouvrage immense et immortel", pour citer Voltaire, marque avant tout l'ampleur des vues et l'énergie intellectuelle de ses concepteurs, sa publication souleva bourrasques et tempêtes.

Ce n'est pas un savoir paisible que celui qu'offre l'*Encyclopédie* : le caractère d'un bon dictionnaire, disait Diderot, "est de changer la façon commune de penser", et ces majestueux in-folio sont, de fait, traversés par les combats politiques, religieux, scientifiques du temps

(lisons, p.e., **DROIT NATUREL, INTOLÉRANCE** de Diderot, **COLLEGE, ELÉMENTS DES SCIENCES** *de d'Alembert, **INOCULATION** de Tronchin). Très vite, une redoutable conjuration - les jésuites, menant campagne dans leur *Journal de Trévoux* et dénonçant l' "impiété" des articles, bientôt relayés par les jansénistes et leurs représentants au Parlement - alerte le pouvoir royal et aboutit à l'interdiction de l'*Encyclopédie* (temporaire en 1752, définitive en 1759, avec révocation du privilège et, peu après, condamnation papale). Les dix derniers volumes de texte, parus en 1765, et les 11 volumes de planches, achevés en 1772, auront vu le jour grâce à l'efficace protection de Malesherbes, alors directeur de la Librairie, au travail inlassable du chevalier de Jaucourt, et surtout à la pugnacité du maître d'œuvre Diderot qui sut affronter, outre ces multiples traverses, des accusations de plagiat, la défection de d'Alembert, et la censure secrète de ses articles par son libraire lui-même.

Les innovations de l'*Encyclopédie* par rapport aux autres grands Dictionnaires universels de son temps, comme celui de Trévoux, dont elle fut à la fois la critique et le dépassement, se marquent essentiellement sur quatre plans :

- **Entreprise collective, elle fait appel aux savants spécialisés, donc aux savoirs vivants et non plus seulement aux compilations livresques : d'Alembert s'occupe de la partie Mathématiques; Daubenton contribue à l'Histoire naturelle, Bordeu, Tronchin, à la Médecine, Rousseau à la Musique, Dumarsais à la Grammaire générale, etc.; parmi ces "talents épars", on trouve aussi Voltaire, Turgot, Jaucourt, d'Holbach, Quesnay, tant d'autres, sans oublier les anonymes, artisans ou artistes : plus de 150 collaborateurs, issus pour la plupart de la bourgeoisie d'Ancien Régime, techniciens, praticiens, liés à l'activité productive du temps.**
- **Elle est un dictionnaire, certes, mais raisonné. Le "système figuré des connaissances humaines", l' "arbre encyclopédique", renouvelé de celui du Chancelier Bacon, fonde l'entendement sur les trois facultés que sont Mémoire, Raison et Imagination, aux multiples ramifications : chaque article est, en principe, accompagné de la "branche" de savoir dont il relève, permettant ainsi d'obvier à l'arbitraire de l'ordre alphabétique par une**

lisibilité transversale renforcée par le système des renvois entre articles.

- Elle intègre les "arts mécaniques" dans le cercle des connaissances : la description des arts et des métiers, impulsée par Diderot, unit l'inventaire des procédés de fabrication, des inventions techniques à la divulgation des secrets d'ateliers. Loin de se limiter à un glossaire de termes techniques, elle inclut une collection sans précédent de définitions; elle témoigne, entre autres, de l'extraordinaire effort de Diderot pour penser une "langue des arts", devenant ainsi - citons Jacques Proust - "le premier homme de lettres qui ait considéré la technologie comme une partie de la littérature".
- Il offre 11 volumes de planches, relais indispensable à la description des métiers : "un coup d'oeil sur l'objet ou sur sa représentation en dit plus qu'une page de discours", souligne Diderot. Grâce aux planches, activité humaine et nature deviennent lisibles, voire limpides. Par les dessins d'abord, dus notamment à L.-J. Goussier, puis par les gravures, sont montrés, outre l'anatomie et l'histoire naturelle, les lieux, les outils, les gestes du travail, surtout de la manufacture, tous les secteurs de la technique et de la production.

Mais, au-delà de ces traits novateurs, ce qui caractérise l'*Encyclopédie* est avant tout d'avoir été un recueil critique : critique des savoirs, dans leur élaboration, leur transmission et leur représentation, critique aussi du langage et des préjugés véhiculés par l'usage, des interdits de pensée, de l'autorité surtout, et du dogme. Et de cette œuvre, à laquelle sceptiques, huguenots, athées, voire pieux abbés ont collaboré, jaillit une véritable polyphonie. "Tentative d'un siècle philosophe", légué à la lointaine postérité, l'ouvrage le plus surveillé et censuré de son temps atteste, au-delà des inévitables erreurs, prudences ou contradictions qu'on y peut rencontrer, de ce que furent les Lumières : l'appétit de savoir, la liberté de penser, le goût d'inventer et la nécessité de douter. Et il émane de ces austères colonnes une impatience allègre, aux antipodes tant de la dérision désabusée que des maussades unions du savoir et du sérieux.

La descendance de l'*Encyclopédie* fut si riche qu'on n'évoquera que sa postérité immédiate : outre un Supplément et une Table,

publiés par le libraire Panckoucke à partir de 1776, signalons les éditions de Genève, de Toscane, la refonte protestante d'Yverdon, l'*Encyclopédie méthodique* de Panckoucke, et, au XIX^e siècle, ces monuments que sont la *Description de l'Égypte*, sous l'Empire, ou, plus tard, le *Grand Dictionnaire* de Pierre Larousse.

L'*Encyclopédie* aujourd'hui, à l'heure des premières tentatives de numérisation de l'ouvrage, nous apparaît étrangement contemporaine : il y a 250 ans en effet qu'elle propose ce que nous appelons un parcours interactif, grâce au jeu incessant des renvois, dont nos liens hypertextes sont l'avatar électronique. Contemporaine, dans sa volonté de questionner et de décloisonner les savoirs. Contemporaine, voire en avance même sur notre temps, par sa capacité à rendre, en une langue limpide, le savoir accessible à ceux qui le cherchent, par son projet didactique auquel seul le souci du "genre humain" et de son avenir donne sens et contenu.

Marie. Leca-Tsiomis

(*Texte paru dans Célébrations nationales 2001*)

En hommage à cette grande entreprise qui inspire en bien des points la nôtre, nous avons imaginé un discours que tiendrait D'Alembert, ressuscité en notre temps (Cf. Rêve de d'Alembert*).

ENERGETISME

Conception de la nature selon laquelle tous les phénomènes consistent en des transformations d'énergie* n'impliquant pas nécessairement des bases matérielles. Développée à la fin du XIX^e siècle par F. Ostwald et Mach*, cette conception était une machine de guerre contre l'Atomisme*, tout en s'inscrivant dans la logique d'une démarche empiriste* et positiviste* de la physique.

ENERGIE

L'énergie c'est ce qui permet de déplacer un corps (produire du travail) ou d'influer sur le mouvement de ce corps. Une force* s'exerce par un apport d'énergie. L'énergie appartient au corps. C'est un attribut*.

Mesure quantitative générale du mouvement* et des interactions*. Comme la notion d'énergie relie d'une manière unitaire tous les phénomènes de la nature elle est matérialisée comme une chose. Ce qui est conforté par la relation entre la masse au repos et de l'énergie introduite par la théorie de la relativité restreinte*(Cf. Equivalence entre la masse et l'énergie*).

L'énergie ne varie pas dans un système isolé. L'énergie pas plus que la matière ne surgit de rien et ne peut disparaître, elle ne peut que se transformer d'une forme en une autre avec les transformations du mouvement, ce qu'exprime le principe de conservation de l'énergie*. La conservation de l'énergie est liée à l'homogénéité du temps (toutes les durées sont équivalentes) et à l'invariance des lois physiques dans le temps.

Selon les différentes formes de mouvement de la matière on parle de différentes formes d'énergie : mécanique, électromagnétique, calorique, chimique, nucléaire. Mais ces distinctions sont bien conventionnelles même si l'on formule certaines lois de transformation partielle de l'énergie qui permettent d'assurer sa conservation globale, comme c'est le cas dans la première loi de la thermodynamique d'équilibre*.

Dans la physique classique* l'énergie d'un système se modifie de manière continue et peut avoir des valeurs arbitraires. La physique quantique* affirme que l'énergie des particules microphysiques qui se déplacent dans un espace limité ne peut prendre qu'un ensemble discret de valeurs. C'est la quantification* de l'énergie.

C'est à travers la notion quantitative d'énergie que l'on peut formuler la notion qualitative de transformation et de conservation de l'énergie et du mouvement. On assiste là à l'existence d'une liaison profonde entre la causalité* et la conservation et la transformation de l'énergie. Une cause* ou un effet* sous tendent toujours un échange d'énergie. L'énergie et l'impulsion* sont des mesures de l'action causale. Le principe de conservation de l'énergie correspond à la devise scholastique : *causa aequat effectum*.

Dans l'histoire de la science on assiste au XIX ème siècle de part les travaux des thermodynamiciens au basculement de l'idéologie newtonienne de la force et du mouvement à l'idéologie de l'énergie, de sa conservation dans les transformations multiples du système.

ENERGIE CINETIQUE

Grandeur égale à la moitié du produit de la masse* d'un corps par le carré de sa vitesse de déplacement. C'est une mesure du mouvement* mécanique.

C'est Leibniz* qui, en 1695, a appelé force vive (vis viva) le produit mv^2 . Cent trente ans plus tard, en 1829, Coriolis a ajouté le facteur $\frac{1}{2}$.

De Leibniz à d'Alembert* s'est prolongée une discussion pour savoir si la mesure du mouvement était la la force vive mv^2 ou la mesure cartésienne (quantité de mouvement* ou impulsion*) mv . Ces deux quantités vont jouer des rôles essentiels en mécanique classique*.

Dans la mécanique du XVII ème et du XVIII ème siècle, à côté du terme force vive, apparait le terme énergie. Terme qui désigne déjà un concept physique chez Aristote*. C'est Jean Bernouilli* qui assimilé l'énergie à du travail.

ENERGIE D'ECHANGE (Interaction d'échange*)

ENERGIE DU VIDE

Le vide quantique* étant le plus bas état d'énergie du champ, la valeur de cette énergie de point zéro présente un intérêt physique considérable. Comme la quantification* du champ introduit une infinité d'oscillateurs harmoniques quantiques, contribuant chacun à l'énergie du vide pour $\frac{1}{2} h\nu$, cette énergie est infinie, ce qui n'est pas sans introduire des difficultés mathématiques dans la théorie quantique des champs* (divergences*). Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'en théorie quantique on ne peut mesurer que les différences d'énergie, si bien que la valeur de l'énergie du vide n'est qu'une convention.

Le problème change d'aspect si l'on s'avise comme en cosmologie* d'identifier la constante cosmologique* avec l'énergie du vide. Mais ce faisant le vide a changé de statut. En fait dans le cadre de la relativité générale* l'énergie du vide s'obtient en mesurant la courbure* de l'espace-temps. Des mesures astronomiques lui donnent une valeur très proche de zéro.

On ne peut sur ce problème que souligner à nouveau l'incompatibilité de point de vue entre la théorie quantique et la relativité générale, et le caractère de construction mathématique à interprétation physique problématique des objets qui peuplent la théorie quantique.

ENERGIE INTERNE

Energie d'un corps ne dépendant que de ses états internes ou états microscopiques invisibles. C'est l'énergie propre, somme de

l'énergie des interactions moléculaires, de l'énergie intramoléculaire et intraatomique et de l'énergie de l'agitation thermique*.

L'énergie interne est une fonction monovalente de l'état* du système. Ceci signifie que pour chaque état du système, la valeur de l'énergie interne a une valeur spécifiée indépendante de l'histoire antérieure du système. Il s'en suit que la variation de l'énergie interne lors du passage d'un état à un autre est égale à la différence des valeurs pour les deux états indépendamment du chemin suivi lors de ce passage.

L'énergie interne n'est pas mesurable directement. On n'a accès qu'à la variation de l'énergie interne qui d'après la première loi de la thermodynamique, est égale à la différence entre la quantité de chaleur absorbée par le système et le travail* effectué par le système contre les forces extérieures.

L'énergie interne est un potentiel thermodynamique*.

ENERGIE LIBRE

L'énergie libre de Helmholtz est une quantité fonction de l'état qui représente le travail effectué par le système contre les forces extérieures dans un processus isothermique. Dans un tel processus on ne peut obtenir sous forme de travail qu'une partie de l'énergie interne*, l'énergie libre.

C'est une expression du second principe de la thermodynamique.

On peut la formuler comme l'énergie interne moins le produit de la température par l'entropie

L'énergie libre est un potentiel thermodynamique*.

ENERGIE NOIRE

L'énergie noire est le nom donné à la cause physique inconnue de l'accélération de l'expansion de l'univers*. Est-ce que l'énergie noire est véritablement une nouvelle composante de la densité d'énergie ou une extension de la physique gravitationnelle au-delà de la relativité générale. Ces questions n'ont pas de réponse. La gravitation comme force attractive agit pour ralentir l'expansion cosmique, ce qui fait que l'énergie noire agit de ce point de vue comme de l'anti gravité ou de la répulsion cosmique.

ENERGIE POTENTIELLE

Partie de l'énergie* d'un système mécanique dépendant de la disposition relative des parties du système et de leur position dans un champ de force extérieur. C'est une énergie disponible pour un

mouvement possible. C'est la faculté d'un corps ou d'un point matériel d'effectuer un travail du fait de se trouver dans le champ d'action de forces*. L'énergie d'un poids tenu à une certaine hauteur dans le champ de la pesanteur. La potentia* aristotélicienne dans toute sa splendeur. Chassez l'aristotélisme il revient au galop ! Ce n'est pas la valeur de l'énergie potentielle qui a une signification physique mais sa variation qui s'avère une force*.

Il peut sembler paradoxal que l'énergie totale d'un système soit la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle. Paradoxe qui se lève si l'on se souvient de ce que l'énergie est en fait la capacité à produire du travail. Selon le principe de conservation* de l'énergie l'énergie cinétique* et l'énergie potentielle se transforment l'une dans l'autre.

La notion d'énergie potentielle est assez récente puisqu'elle a été introduite par Helmholtz* en 1847.

ENSEMBLES (Théorie des)

Un ensemble est un pluralité d'objets que l'on peut considérer comme formant un tout*.

Un ensemble est formé d'éléments susceptibles de posséder en commun certaines propriétés* (ou attributs*) et d'avoir entre eux ou avec des éléments d'autres ensembles certaines relations.

Un ensemble peut être défini (en extension) par la connaissance individuelle de chaque élément particulier m.

Un ensemble peut être défini (en intention) par l'énoncé de propriétés restrictives caractérisant l'élément générique x de E au sein d'un ensemble de référence plus vaste. Mais un ensemble étant bien défini on peut regarder ses éléments comme définis, mais ils ne sont pas forcément connus. Ainsi il est possible de définir des ensembles de fonctions sans qu'il soit possible de donner un seul exemple de ces fonctions.

Connaissant tous les éléments particuliers d'un ensemble, on peut énoncer les propriétés caractérisant l'élément générique, c.a.d. énoncer des théorèmes. Ainsi de dire d'un nombre s'il est réel ou entier.

Connaissant les propriétés de l'élément générique on peut chercher à déterminer chaque élément particulier, c.a.d. résoudre un problème. Ainsi trouver parmi les nombres réels ceux qui vérifient une équation donnée.

Etant donné un ensemble E et une propriété d'un élément générique, ceux des éléments de E qui possèdent cette propriété

forment un nouvel ensemble, nommé partie ou sous ensemble de E, A. Tout élément de A appartient à E.

En particulier E contient comme parties, E lui-même, l'ensemble vide, et les parties réduites à un seul élément.

On définit un certain nombre d'opérations élémentaires sur les ensembles :

L'intersection des ensembles A et B : l'ensemble des éléments communs à A et B (conjonction de coordination ET).

La réunion de A et B : ensemble des éléments appartenant soit à A soit à B (conjonction de coordination OU)

Notons l'aspect contre intuitif de et et ou.

Pour une partie A de E, le complémentaire de A par rapport à E est l'ensemble des éléments de E qui n'appartiennent pas à A.

La différence de A et B est l'ensemble des éléments de A qui n'appartiennent pas à B.

Les opérations sur les ensembles sont représentées par des dessins explicites , les diagrammes de Venn.

La théorie des ensembles, créée au XIX ème siècle par Georges Cantor, a servi de fondement à toutes les mathématiques modernes. Elle en particulier servi dans l'étude des ensembles infinis (elle révolutionne l'étude de l'infini* au point que l'on peut dire qu'elle est la théorie mathématique de l'infini) et fournit un langage pour la théorie des fonctions. Elle joue avec la logique formelle* un rôle central dans le bourbakisme*.

« ...alors qu'autrefois on a pu croire que chaque branche des mathématiques dépendait d'intuitions particulières qui lui fournissaient notions et vérités premières, ce qui eut entraîné pour chacune la nécessité d'un langage formalisé qui lui appartient en propre, on sait aujourd'hui qu'il est possible, logiquement parlant, de faire dériver presque toute la mathématique actuelle d'une source unique, la Théorie des Ensembles. » (Bourbaki)*

ENSEMBLE STATISTIQUE

Ensemble d'un très grand nombre de systèmes physiques (de copies de ce système) se trouvant dans des états macroscopiques identiques, définis par les mêmes paramètres macroscopiques, mais dont les états microscopiques peuvent différer. C'est un concept de la physique statistique* permettant l'application à des problèmes

physiques des méthodes de la théorie des probabilités. Il permet de décrire des équilibres statistiques* où les états macroscopiques sont décrits par les valeurs moyennes des grandeurs physiques.

Ainsi peut on représenter un système isolé à énergie totale constante (ensemble microcanonique de Gibbs*), un système au contact avec un thermostat à température constante (ensemble canonique de Gibbs*) ou un système en contact avec un thermostat et un réservoir de particules (ensemble grand canonique de Gibbs*).

En mécanique quantique un ensemble statistique est un ensemble de systèmes microphysiques identiques ayant subi la même préparation* et donnant aux observables* les valeurs possibles admises par l'interprétation probabiliste. C'est un ensemble conceptuel de répliques du même système et en aucun cas un mélange statistique* de systèmes, comme le serait un flot de tels systèmes. A l'état macroscopique défini par la préparation on adjoit les états « macroscopiques » correspondant aux résultats des mesures et non pas des états microscopiques définis par des attributs microscopiques. Une des interprétations de la mécanique quantique (interprétation statistique* de Ballentine) consiste à considérer qu'un état pur* est une description des propriétés statistiques d'un ensemble de systèmes préparés de manière identique et soumis à la mesure*, plutôt qu'une description complète et exhaustive d'un système individuel. Mais ce n'est qu'une manière de reformuler la notion de probabilité et repose toujours sur la définition de l'état comme caractéristique de la procédure de préparation.

ENTELECHIE

Notion aristotélicienne d'une nature parfaitement achevée dans ses formes et dans ses fins lors du passage de la puissance* à l'acte*. Notion reprise par le biologiste Hans Driesch pour signifier une force immanente aux êtres vivants dans la polémique entre vitalisme* et mécanisme*.

ENTROPIE

Concept tout d'abord introduit en thermodynamique* pour définir une mesure de la déperdition irréversible d'énergie. Clausius (1865) a effectivement utilisé l'entropie pour formuler mathématiquement les limitations que le second principe de la

thermodynamique* impose aux transformations de la chaleur en travail.

L'entropie est une fonction de l'état* thermodynamique d'un système caractérisant la direction dans laquelle se déroule le processus d'échange de chaleur entre un système et le milieu extérieur, ainsi que la direction dans laquelle se déroule librement un processus à l'intérieur d'un système. Les processus irréversibles* s'accompagnent de la croissance de l'entropie. Dans un état d'équilibre l'entropie est maximum.

La notion d'entropie est largement utilisée en dehors de la thermodynamique: en physique statistique comme mesure de la probabilité de réalisation d'un état macroscopique; en théorie de l'information* comme mesure de l'incertitude liée à une interrogation expérimentale qui peut compter plusieurs réponses (entropie de Shannon). Ces différentes utilisations de l'entropie ont entre elles des liens profonds. Ainsi on peut, sur la base de considérations informationnelles déduire les principales lois de la physique statistique.

Information*, entropie* et action* sont des concepts d'une même famille souvent difficile à caractériser physiquement.

ε ENTROPIE

On peut considérer la donnée d'un objet comme résultant de deux sortes d'informations :

- 1) des informations sur un ensemble auquel l'objet appartient
- 2) des informations permettant de distinguer l'objet parmi les éléments de l'ensemble. Cette contrainte de distinction introduit la problématique du pouvoir séparateur*. Si le pouvoir séparateur de nos instruments est ε nous devons nous résigner à considérer comme équivalents deux objets dont la distance est inférieure à ε .

Cette idée d'un espace muni d'une tolérance ε remonte à Fechner et Poincaré* et a été souvent découverte depuis. Le problème fondamental est celui de la quantité minimale d'information nécessaire pour définir un élément d'un ensemble.

On appelle entropie d'un ensemble de N éléments le logarithme de base 2 de N . C'est le nombre maximal de signes binaires (ou de questions dichotomiques) nécessaire pour déterminer un élément de l'ensemble.

On appelle ε entropie d'un ensemble G , le logarithme népérien de base 2, d'un nombre qui est le nombre d'éléments nécessaires pour recouvrir G par un nombre minimal d'ensembles de diamètre ε . C'est l'entropie d'un ensemble à N éléments où l'on introduit une

tolérance ϵ dans la distinction entre éléments. Ainsi la théorie de l'information prend en compte la précision des mesures.

ENTROPIE DE KOLMOGOROV-SINAI

ENZYME

Toute molécule servant de catalyseur dans une réaction biochimiques. Les enzymes sont en général des protéines.

EPIGENETIQUE

La biologie épigénétique est l'étude des modifications des caractères génétique lors du développement, dûs à l'environnement. C'est la doctrine de l'acquis dans la problématique de l'inné et de l'acquis*.

EPIPHENOMENE

Un épiphénomène désigne ce qui se surajoute à un phénomène* sans exercer sur lui aucune influence. Autrement dit, c'est une manifestation pure, un aspect ou une apparence particulière d'un phénomène sous-jacent, et non une manifestation possédant une réalité indépendante capable d'exercer une rétroaction* sur le phénomène qui lui a donné naissance.

On qualifie d'épiphénomène un phénomène dont on suppose ne percevoir qu'une petite partie de ce qui est à l'œuvre réellement. Un épiphénomène est donc la manifestation de mécanismes dont on ne connaît qu'une partie ou que l'on ne connaît pas encore. D'où le fait que l'épiphénomène soit usuellement considéré comme mineur et sans importance.

Cette notion d'épiphénomène est fondamentale en science et dans toute constitution du savoir : l'observation du monde donne une quantité très importante d'épiphénomènes qui sont autant de sujets d'investigations pour les chercheurs.

Le terme est employé pour décrire la conscience* comme complètement passive, et ne jouant aucun rôle fondamental, comme un simple reflet du contenu de l'univers. C'est un concept beaucoup utilisé par les partisans du behaviorisme*.

EPISTEME

L'épistémè d'une époque renvoie à une façon de penser, de parler, de se représenter le monde, qui s'étendrait très largement à toute la culture. Dans *Les mots et les choses* (1966) et *L'archéologie du savoir* (1968) Foucault décrit trois épistémè successives : celle de la renaissance, de l'époque classique, et de l'époque moderne.

Dans *Les mots et les choses* Michel Foucault écrit au sujet de l'épistémè:

"Il ne sera pas question de connaissances décrites dans leur progrès vers une objectivité dans laquelle notre science d'aujourd'hui pourrait enfin se reconnaître ; ce que l'on voudrait mettre au jour, c'est le champ épistémologique, l'épistémè"... décrivant les "conditions de possibilité" des connaissances. "Plutôt que d'une histoire au sens traditionnel du mot, il s'agit d'une archéologie". Or, cette enquête archéologique a montré deux grandes discontinuités dans la culture occidentale : celle qui inaugure l'âge classique (vers le milieu du XVIIe siècle) et celle qui, au début du XIXe siècle marque le seuil de notre modernité". (p.13)

L'épistémè du monde contemporain voit s'effondrer les barrières entre les catégories classiques sous l'influence des communications ultra rapides, de la mondialisation et de l'écologie. Le concept dominant est celui d'interaction.

EPISTEMIQUE (Caractère)

Les discours sur la nature peuvent avoir un caractère ontologique* ou épistémique. Le discours ontologique concerne la structure et le comportement d'un système en lui-même, lorsque « personne ne l'observe ». Il présente un caractère d'immanence*. Le discours épistémique concerne la constitution de la connaissance du système par l'obtention d'information et par l'action. Le discours ontologique n'est pas toujours possible et seul subsiste le discours épistémique, comme c'est le cas en mécanique quantique ou en théorie des probabilités. Dans la théorie des systèmes dynamiques*, les deux discours coexistent. C'est ainsi que le chaos* déterministe a un caractère ontologique lié à la perte de mémoire lors de l'évolution et un caractère épistémique qui se manifeste dans les problèmes de prévisibilité* et de prédictibilité*.

EPISTEMOLOGIE.

Science et philosophie de la connaissance scientifique* des objets et des phénomènes. Etude critique des conditions et des méthodes de la connaissance scientifique. Entre l'ontologie* et l'épistémologie, il y a le même rapport qu'entre la théorie et la pratique, c.a.d. la prise en compte du rôle de l'observateur*. Deux pôles fondamentaux s'opposent dans les discours sur la nature de la connaissance scientifique. Deux attitudes qui recouvrent en un certain sens deux visions de la Nature.

L'attitude réaliste* : il existe une nature profonde indépendante de notre discours et de nos observations. Le "Comme ça". L'appréhension de cette nature passe à travers les constructions mentales de la raison. Le "Comme si". Avec paradoxalement la tentation du constructivisme* radical qui défend l'autonomie de la pensée.

L'attitude positiviste*-empiriste* : seuls les faits observables - le "Comme ça" - sont source de connaissance scientifique. Tout le reste est métaphysique* au plus mauvais sens du terme.

Tout en sachant pourtant que les faits observables n'existent pas en eux mêmes et dépendent toujours d'une construction théorique.

L'objectivité* est la question centrale de toute épistémologie.

EPISTEMOLOGIE ET COGNITION

EPISTEMOLOGIE ET EVOLUTION

EPISTEMOLOGIE DES MATHEMATIQUES

EPISTEMOLOGIE DE LA PHYSIQUE

L'épistémologie de la physique se doit de statuer sur la valeur de la connaissance physique autorisée par ses différentes ontologies*. A vrai dire toute ontologie* suppose une prise de position épistémologique (et idéologique) implicite, souvent inconsciente, sur l'existence réelle et le degré de vérité des termes du discours sur le monde. Ainsi l'ontologie émerge souvent d'une épistémologie à priori, qui réévalue par la suite la nature des concepts engendrés.

La grande affaire de l'épistémologie de la physique est de qualifier le degré de réalité* et d'objectivité* des objets qu'elle met en action. Le développement de discours de plus en plus complexes des

théories physiques et la prise de conscience par les sciences cognitives des modalités spécifiques de la connaissance, donnent aujourd'hui à l'épistémologie de la physique un tour nouveau. Elle doit nécessairement prendre en compte explicitement le rôle de l'observation des phénomènes sans véritablement renoncer à la pensée d'une réalité qui existe en dehors de nous. Mais la réalité n'est plus une option métaphysique, elle doit émerger comme une conviction (transcendantale ?) issue de l'analyse de l'expérience.

« Que les choses soient ou non posées dans leur réalité extérieure, elles ne se révèlent réelles et existantes qu'en tant qu'elles sont reliées entre elles, porteuses ou révélatrices d'une relation (y compris avec l'observateur). C'est toujours la même question de la spécification existentielle des termes du rapport par le rapport lui-même, la seule différence entre les théories tenant alors à la réalité que l'on estime pouvoir attribuer aux termes lorsqu'ils sont envisagés indépendamment des rapports » (Maryse Dennes).

Ainsi en définitive, réalité et objectivité dépendent de la manière dont le discours théorique de la physique trouve des façons de se rendre opératoire. L'opérationnalisme* selon Bridgman se profile à l'arrière plan de toute la pensée scientifique contemporaine. La tâche de l'épistémologie* est de comprendre comment les structures formelles du discours de la physique s'articulent avec les opérations du physicien face à la nature. Ce qui a pour effet de donner des modèles physiques une interprétation de type calculatoire où la notion d'information* s'avère centrale. C'est là le thème dominant de toute l'œuvre d'un physicien comme R. Landauer.

La tâche de l'épistémologie de la physique consiste à essayer de décrire les procédures transcendantales de justification du discours théorique. Ce qui a déjà été bien remarqué par Kant qui disait que quoique contienne notre concept d'un objet nous sommes toujours obligé d'en sortir pour lui attribuer l'existence. Et comme en écho, Duhem* d'affirmer avec force : « La croyance en un ordre transcendant à la physique est la seule raison d'être de la théorie physique ».

C'est dans ces démarches épistémologiques que le concept d'information se trouve parfaitement adapté à l'examen de l'univers des possibles, en tant que mesure de l'identité et de l'organisation.

La pensée commune en dehors des physiciens, est de les considérer tous comme des réalistes* et bien évidemment des matérialistes*. Pour un biologiste ou un homme cultivé aujourd'hui, cela ne fait aucun doute. Il n'en est pas ainsi. Parmi les physiciens du XX^e siècle on peut trouver des positions épistémologiques très

différentes. Au début du siècle certains adhéraient au conventionalisme* de Poincaré* ou au symbolisme* de Hertz*. Einstein* et Heisenberg*, dans leurs moments révolutionnaires, ont utilisé des concepts positivistes*, qu'ils ont abandonné plus tard. Einstein est devenu réaliste*. Par contre à cause des difficultés d'une interprétation* réaliste de la mécanique quantique, la plupart des physiciens sont devenus instrumentalistes*. Une affirmation récente de cette position se trouve dans un article provocateur, mais plein de bon sens, de Fuchs et Peres* : « *Quantum mechanics needs no interpretation* ». Bohm* et de Broglie* ont été souvent les porte drapeaux d'une attitude réaliste, et bien d'autres attitudes réalistes existent liées à des interprétations exotiques de la mécanique quantique (pluralité des mondes, pluralité des esprits, histoires consistantes). Le débat sur les variables cachées* autour de l'expérience d'Aspect* porte de nombreux physiciens à abandonner le concept de réalité*. Même lorsque des physiciens comme Steven Weinberg* proclament leur réalisme, il faut tempérer ces affirmations. Si l'on prend en compte le constructivisme* et la problématique de la signification de Wittgenstein*, il n'est pas trivial de donner aux mots un sens en dehors de tout contexte. La physique contemporaine est prudente, on peut la qualifier d'agnostique* épistémologiquement, c.a.d. sans avis définitif sur la nature de la connaissance qu'elle procure.

EPISTEMOLOGIE ET SOCIETE

EPISTEMOLOGIE GENETIQUE

EPISTEMOLOGIE NATURALISTE

EQUATION

Relation entre des fonctions et des variables donnant lieu à une égalité . Si l'on regroupe tous les termes d'un côté on obtient une expression que l'on égale à zéro. La servante du Professeur Cosinus s'étonnait de ce que l'on prenne la peine d'écrire tout cela au tableau pour dire que c'était zéro. Dans une équation certaines variables ou certaines fonctions jouent le rôle d'inconnues. Résoudre une équation c'est rechercher la ou les valeurs des variables pour lesquelles l'expression mathématique est vraie.

EQUATION AUX DERIVEES PARTIELLES

Equation différentielle* contenant une fonction de plusieurs variables et leur dérivées* partielles.

EQUATION D'ETAT

.En physique, et plus particulièrement en thermodynamique, une **équation d'état** d'un système à l'équilibre thermodynamique est une relation entre différents paramètres physiques (appelés variables d'état) qui déterminent son état. Il peut s'agir par exemple d'une relation entre sa température, sa pression et son volume. À partir de l'équation d'état caractéristique d'un système physique, il est possible de déterminer la totalité des quantités thermodynamiques décrivant ce système et par suite de prédire ses propriétés.

Les équations d'état d'un système ne sont pas contenues dans les postulats de la thermodynamique. Elles proviennent de l'expérience ou de modèles fournis par la physique statistique.

Les équations d'état sont généralement restreintes à un type de comportement ou de phénomènes physiques donnés. Un même corps peut donc avoir plusieurs équations d'état, concernant par exemple son état magnétique ou son état thermodynamique.

Pour qu'un corps puisse être caractérisé par une équation d'état à un instant donné, il faut que l'état de ce corps dépende uniquement des valeurs prises par les paramètres à cet instant. Les corps présentant un phénomène d'hystérésis ne peuvent donc pas être caractérisés par une équation d'état.

EQUATION DE SCHRÖDINGER

L'équation de Schrödinger est la clef de voute de tous les calculs concrets sur des objets quantiques*. Sans elle la mécanique quantique n'existe pas, car il faut bien avouer qu'elle se structure comme toutes les théories classiques, autour d'une équation du mouvement des états.

Schrödinger a trouvé cette équation d'une manière heuristique, motivé par la lecture de la thèse de Louis de Broglie sur le dualisme onde corpuscule*. Une thèse dont Einstein avait écrit qu'elle « levait un coin du voile ». Ce faisant il pensait obtenir une équation pour le mouvement d'une onde, d'où le terme de fonction d'onde qui est resté inscrit dans la théorie.

En résolvant son équation dans le cas stationnaire* pour l'atome d'hydrogène il a trouvé pour l'énergie un spectre discret* de valeurs suivi d'un spectre continu*. Le spectre discret permettant, par différence de ses valeurs, de retrouver exactement le spectre* de raies* de l'atome. Confirmation éclatante de la quantification* et raison essentielle du succès de cette équation. En fait dans ce cas stationnaire,

la résolution de l'équation de Schrödinger constitue la résolution d'un problème aux valeurs propres* pour l'opérateur* énergie.

La théorie fut appelée mécanique ondulatoire, car les créateurs de la théorie quantique pensaient écrire des équations du mouvement et créer une nouvelle mécanique. Heisenberg de son côté pensait développer une mécanique des matrices.

Ce fut un coup de tonnerre lorsque Born* interpréta la fonction d'onde comme l'élément d'un calcul de probabilités.

Le carré de la fonction d'onde est la probabilité de présence de la particule en un point, donnant à la fonction d'onde le statut inhabituel d'amplitude de probabilité.

Le succès de l'équation de Schrödinger dans la description de l'atome d'hélium, puis d'atomes à plusieurs électrons, n'a pas peu contribué à assurer la confiance dans cette équation « tombée du ciel » et à instaurer un calcul des probabilités où la probabilité est obtenue à partir d'une amplitude de probabilité. Mais la fonction d'onde* ne s'exprime pas dans l'espace physique réel mais dans l'espace de configuration* à $3n$ dimensions, ce qui lui ôte tout caractère physique direct.

EQUATION DIFFERENTIELLE

Beaucoup de courbes dans l'espace peuvent être caractérisées par une relation générale entre les coordonnées de leurs points et un certain nombre d'éléments géométriques en chaque point: tangente, courbure..... Cette relation entre une fonction* et ses dérivées* est appelée équation différentielle et constitue une définition locale de la courbe, par la donnée de son comportement au voisinage immédiat de chaque point. C'est ce comportement qui correspond en physique aux lois élémentaires. La plupart des grandes théories physiques sont ainsi essentiellement constituées par la donnée d'équations différentielles. La Mécanique Classique*, ce sont les équations de Newton, Lagrange ou Hamilton. L'Electromagnétisme ce sont les équations de Maxwell*. La Relativité Générale* ce sont les équations d'Einstein. La Mécanique Quantique* c'est l'équation de Schrödinger*

Intégrer une équation différentielle signifie obtenir par un procédé théorique ou numérique la forme exacte de la courbe (fonction) inconnue, lorsque l'on possède seulement le comportement local donné par l'équation différentielle. Du local au global.

Le comportement d'un système dynamique* est modélisé par la donnée de systèmes d'équations différentielles. Ce sont les propriétés mathématiques de ces équations différentielles qui traduisent les

caractéristiques du mouvement et manifestent en particulier l'apparition des formes. Ce rôle déterminant de l'examen des équations différentielles a été souligné par Henri Poincaré* et lucidement envisagé par Stéphane Leduc* qui soulignait le fait que les formes et les structures sont l'expression des mouvements et des forces qui les accomplissent et qui les engendrent et que beaucoup de phénomènes de l'univers ont la même structure dynamique, entendez les mêmes équations différentielles.

EQUATION FONCTIONNELLE

Une équation fonctionnelle est une équation dont une ou plusieurs inconnues sont des fonctions*.

EQUATION INTEGRALE

Equation fonctionnelle* contenant la fonction cherchée sous le signe intégrale*.

La théorie des équations intégrales est beaucoup plus récente que celle des équations différentielles, datant de la fin du XIX^e siècle.

EQUIDISTRIBUTION (D'UNE SUITE ARITHMETIQUE)

Une suite de nombres est dite équidistribuée si lorsque cette suite contient de plus en plus d'éléments le nombre d'éléments dans une région donnée tend à être proportionnel à la mesure de la région. Les points d'une trajectoire de phase d'un système dynamique ergodique sont équidistribués. Cette « ergodicité » des suites rééquidistribuées en fait des candidats privilégiés pour l'emploi dans la méthode de Monte Carlo à la place de nombres aléatoires* (ou pseudo-aléatoires*). Ce sont des nombres quasi aléatoires*. Un ensemble limité de tels nombres peut constituer une base raisonnable d'échantillonnage* d'une fonction.

EQUIFINALITE

EQUILIBRE

Situation physique où malgré le mouvement local l'aspect global du système ne se modifie pas au cours du temps. L'équilibre résulte en général d'une compensation des facteurs qui provoqueraient l'évolution du système, en particulier de la compensation des forces.

L'équilibre est en général associé à l'absence d'évolution. Un système en équilibre est un système au repos, qui sera perturbé par une action extérieure.

Dans la théorie des systèmes dynamiques*, où c'est l'état* qui évolue, on parle d'état d'équilibre*.

Il fut un temps où les phénomènes d'équilibre occupaient le devant de la scène des théories physiques. Le temps n'est plus où les phénomènes immuables focalisaient l'attention. Ce ne sont plus d'abord les situations stables ou les permanences qui nous intéressent, mais les évolutions, les crises et les instabilités.

Et pourtant nous cherchons dans ce qui se transforme à déterminer ce qui demeure : attracteurs*, stabilité structurelle*.

EQUILIBRE MECANIQUE

Etat d'un système mécanique subissant l'action de forces mais dont toutes les parties sont au repos par rapport à un certain système de référence.

EQUILIBRE STATISTIQUE

Situation d'un système statistique où toutes les valeurs moyennes des grandeurs physiques sont constantes au cours du temps. L'équilibre statistique se distingue d'un équilibre mécanique par l'existence de fluctuations* (dispersion des grandeurs physiques autour de leurs valeurs moyennes).

L'équilibre statistique se décrit à l'aide des ensembles statistiques* de Gibbs qui diffèrent selon le type de contact que le système entretient avec l'extérieur. A ces ensembles correspondent différentes distributions de probabilité des états microscopiques.

Le résultat le plus célèbre concerne l'équilibre statistique d'un ensemble de molécules se déplaçant selon les lois de la mécanique classique. Maxwell a établi en 1859 que la distribution des vitesses est inversement proportionnelle à l'exponentielle de la masse multipliée par le carré de la vitesse et divisé par kT , où k est la constante de Boltzmann* et T la température absolue. Ce résultat fonde la physique statistique. Il a été vérifié expérimentalement par O. Stern en 1920

EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

La notion d'équilibre thermodynamique est à la base de la thermodynamique*.

Ce concept exprime d'une manière générale les propriétés de tout système macroscopique fini au bout d'un temps suffisamment

long d'évolution spontanée dans des conditions extérieures constantes. Cet état se caractérise par l'interruption de toutes les variations macroscopiques, en particulier de tous les processus irréversibles* comme la dissipation de l'énergie, la diffusion de la chaleur, la diffusion ou les réactions chimiques. Une fois atteint cet état se maintient indéfiniment, et ne peut être modifié que par une intervention extérieure. Le processus qui mène à l'état d'équilibre est appelé processus de relaxation*..

Un système se trouve en équilibre thermodynamique quand son potentiel thermodynamique* correspondant à la variable indépendante, est minimal.

EQUIVALENCE ENTRE LA MASSE ET L'ENERGIE

Conception physique de la théorie de la relativité restreinte selon laquelle l'énergie d'un système physique est égal à sa masse* multipliée par le carré de la vitesse de la lumière dans le vide.

$E=mc^2$. La formule a frappé les esprits et est devenue célèbre. Elle recouvre deux concepts physiques selon l'interprétation des termes masse et énergie. D'une part elle signifie que la masse au repos dans un repère correspond à de l'énergie interne, énergie au repos. D'autre part on peut affirmer qu'à toute forme d'énergie correspond une certaine masse, la masse relativiste.

ERREUR

En dehors de la logique*, où elle se manifeste par une contradiction, l'erreur est un phénomène aléatoire entachant le déroulement normal* d'un processus. Comme toute perturbation son effet se mesure à ses conséquences. Elle peut se manifester comme un mauvais choix (aléatoire) d'un concept pour bâtir une théorie ou élaborer un raisonnement. Mais loin de s'opposer à la vérité* elle peut contribuer à l'obtention de celle-ci. Tous les processus naturels sont sujets à des erreurs dont beaucoup sont tolérables et même à l'origine du déroulement normal de ceux-ci, car les erreurs constituent une exploration du champ des possibles*. Tout en distinguant soigneusement l'erreur de l'errance (mouvement brownien*) Ainsi les mutations* sont des erreurs dans le processus de réplication de l'ADN*. La science* procède par essais et erreurs.

On évoque couramment les erreurs de mesure* dues à l'imprécision des appareils, les erreurs de prévision* dues à la complexité des phénomènes, ou les erreurs statistiques* dues à l'extrapolation des résultats d'une étude limitée à un échantillon.

La reconnaissance des erreurs est un avantage épistémologique certain dans le développement d'une théorie. Une théorie ou un modèle approché peut, nonobstant l'erreur, se développer d'une manière fertile. Ainsi la mécanique classique, en négligeant systématiquement le frottement*, a su produire une théorie qui non seulement s'applique parfaitement au mouvement des planètes mais produit un modèle mathématique, celui du système hamiltonien*, aux conséquences essentielles en physique théorique. La longue épopée du concept d'éther* (Cf. Vide*-Histoires de), concept erroné dans la forme où il se présentait avant Einstein*, a contribué à façonner la notion contemporaine de vide quantique*. L'erreur d'Einstein en introduisant la constante cosmologique* dans un modèle d'univers statique, permet aujourd'hui de réintroduire cette constante en liaison avec le vide quantique dans un modèle d'univers en expansion*.

Selon Popper*, la force d'une théorie réside dans sa falsifiabilité*, soit dans la possibilité de la confronter à l'expérience. Les inégalités de Bell* ont permis de tester la falsifiabilité de la mécanique quantique

ERGODICITE (Cf. Théorie qualitative des systèmes dynamiques*)

ERGODIQUE (Hypothèse ergodique)

Hypothèse de la physique statistique selon laquelle la moyenne temporelle de la valeur d'une variable physique caractérisant un système statistique* est égale à sa moyenne statistique*. Hypothèse formulée par Boltzman en 1887 pour fonder la mécanique statistique*.

Cette hypothèse ou cette propriété démontrée, s'avère insuffisante pour justifier un comportement aléatoire* d'un système dynamique*. Une propriété plus forte est nécessaire, le mélange*.

L'hypothèse d'ergodicité intervient également en traitement du signal* où elle consiste à admettre que l'évolution d'un signal* aléatoire au cours du temps apporte la même information qu'un ensemble de réalisations.

Sous une forme plus étroite, formulée par Boltzman, cette hypothèse dit que les trajectoires de phase* d'un système dynamique

fermé passent au cours du temps aussi près que l'on veut de tout point sur une surface d'énergie constante.

La théorie ergodique (Théorie qualitative des systèmes dynamiques*) étudie les conditions qui rendent l'hypothèse ergodique vraie. Elle a été démontrée comme théorème par Birkhoff* et par Von Neumann*. Selon ce dernier un système vérifie l'hypothèse ergodique lorsque la surface d'énergie ne peut être divisées en des domaines finis tels que une trajectoire de phase reste entièrement à l'intérieur d'un de ces domaines. Démontrer qu'un système réel vérifie l'hypothèse ergodique, reste un problème complexe non encore résolu. C'est le mérite de Sinai* de l'avoir démontrée pour un billard* plan, en démontrant une propriété plus générale, le mélange μ

ERGODIQUE (THEORIE) (Cf Théorie qualitative des systèmes dynamiques*)

La théorie ergodique est la partie de la théorie des systèmes dynamiques* consacrée à l'étude de leurs propriétés statistiques. L'apparition de la théorie ergodique dans les années 30 a été stimulée par les tentatives de démonstration de l'hypothèse ergodique*, formulée à la fin du XIX^e siècle par Boltzman pour fonder la mécanique statistique*.

ERLANGEN (Programme d') (Cf. Programme d'Erlangen*)

ESOTERISME

Tout système formel, discours ou doctrine, se présente comme une littéralité explicite (exotérique). L'explicitation est en fait une condition d'autonomie, nécessaire si l'on veut assurer la transmissibilité à un collectif suffisamment large. Il en est ainsi pour les systèmes philosophiques et religieux, scientifiques et artistiques. Ils sont d'abord porteurs d'une rationalité collective, grâce à leur caractère de fermeture qui n'est d'ailleurs pas toujours atteint. Mais au niveau individuel (ou de petits groupes) on peut chercher à sortir de l'emprise formaliste, à se plonger dans un système extérieur ou plus vaste. Une démarche d'élargissement vers du complexe difficile à expliciter. Une vision du monde socialement inavouable, mais porteuse de sens dans l'intimité. Et difficile à partager. Il en découle une démarche ésotérique, transmission initiatique de doctrines et de pratiques secrètes, réservées à un nombre restreint d'adeptes. S'agit il d'un choix ou d'une nécessité ?

La notion d'ésotérisme voit s'affronter de nombreux thèmes essentiels :

Fermeture, intérieur, extérieur, frontière,
pénétration, passage, transition
Accessibilité, explicabilité, observabilité,
calculabilité, incomplétude
Codage et transmission de l'information
Symbolisme et signification

La nécessité de la démarche ésotérique peut se fonder sur

La reconnaissance de l'existence de qualités ou de phénomènes occultes (Cf. Occultisme*)

L'impossibilité de communiquer la signification du libre jeu des analogies, des associations et des dérives verbales en dehors d'un petit cercle d'initiés.

ESPACE

L'espace est une forme* d'existence de la matière* et des champs*. Une manifestation des degrés de liberté du mouvement. Plus généralement la physique mathématique* appelle espace un ensemble de quantité variables entre lesquelles se « meut » le système (Cf. Espace interne*). L'espace est un ensemble géométrique des caractéristiques d'un objet. La géométrie* est une théorie générale des espaces et des transformations qui y sont possibles.

L'espace est un concept qui exprime la réalité du lieu où se trouvent les corps et la réalité éventuelle de ce qui sépare les corps. La notion d'espace est intimement liée à celle de vide*. Les atomes ne peuvent se mouvoir que s'ils ne sont pas complètement entourés d'autres atomes, c'est à dire s'ils sont entourés d'espace vide. Aristote* pensait que la nature a horreur du vide et remplaçait l'espace par la notion de place. Nous identifions les corps par rapport aux corps environnants et repérons de même le mouvement. A travers le Moyen-âge et la Renaissance c'est la doctrine d'Aristote qui a dominé.

C'est Newton* au XVII^e siècle qui a proclamé l'existence d'un espace absolu, en s'opposant à Leibniz* et en ravivant la discussion entre substantialisme* et relationalisme*. La conception de Newton a prévalu jusqu'à la fin du XIX^e siècle, où elle a été considérée comme un non observable* à caractère métaphysique par Ernst Mach*. C'est sous l'influence de Mach qu'Einstein a proclamé la victoire relativiste

sur l'espace absolu et l'absence d'espace vide* car il n'y a pas d'espace dépourvu de champ*.

Mais la relativité restreinte n'exclut pas l'espace absolu, elle se borne à préciser les circonstances où il ne se manifeste pas au profit de l'espace apparent.

La relativité introduit, pour ainsi dire, un nouvel espace absolu qui solidarise l'espace et le temps, l'espace-temps*. C'est l'espace des évènements*.

L'espace pose le problème redoutable de sa continuité et de son éventuelle structure. Problème lié à celui de l'action à distance*. Leibniz, en tant que géomètre, se demandait si le continu* peut être constitué d'indivisibles et y répondait non. Mais en tant que métaphysicien il reconnaît comme réalité l'existence de « centres de forces indivisibles », les fameuses monades*. Pour Kant* « dans le monde des phénomènes* ou monde de l'expérience, nous n'avons affaire qu'avec le continu ; par contre l'indivisible (le simple) ne peut se rencontrer que dans le monde des choses en soi ». Dans la physique actuelle, le problème de l'espace devient celui du champ*. La continuité du champ est admise par la théorie de l'éther*. Mais le message des monades est parfaitement reçu lorsque la théorie quantique des champs introduit les quanta* du champ et interprète les fluctuations de l'observable champ comme l'émission et l'absorption de particules virtuelles. Obstinement, sans cesse, les vieilles idées renaissent.

En fait ce sont deux conceptions de l'espace qui s'opposent, l'une matérialiste, qui considère un espace objectif, l'autre, idéaliste, pour laquelle l'espace n'est qu'une forme* à priori de notre entendement (Kant*, kantisme*) ou un complexe de sensations ou de données ordonnées selon leur fonctionnalité (Berkeley*, Mach*, positivisme*).

La physique quantique*, en particulier celle des particules élémentaires, peut donner le sentiment d'évènements se déroulant dans un espace spécifique. Peut-être ? Mais pour la mécanique quantique qui ne considère que des mesures de « raison » dans l'espace ordinaire du laboratoire, il n'est pas question d'interpréter dans un espace différent, les observations de « fait ». L'image du monde de la mécanique quantique n'est qu'un discours mathématique.

Pour les besoins d'expression de concepts particuliers, mathématiciens ou physiciens introduisent des espaces spécifiques comme l'espace de phase*, l'espace de configuration*, l'espace-temps* quadridimensionnel ou l'espace interne* comme pour les cordes* ou le champ de jauge*. Quant aux mathématiciens ils considèrent des

espaces constitués d'objets complexes (espace vectoriel*, espace de Hilbert*...)

Parmi les preuves de la tridimensionnalité de l'espace ordinaire, il y'a le fait que c'est seulement en dimension trois que l'équation de Schrödinger de l'atome d'hydrogène a des solutions stationnaires discrètes.

Le problème de la dimensionnalité de l'espace se pose d'une manière inattendue dans la théorie des objets fractals*, qui remplissent « mal » l'espace où il sont définis, si bien que l'on peut les associer à un espace de dimension fractionnaire. On voit là à l'œuvre le rapport entre l'espace et la topologie*.

Tout comme pour le temps biologique, l'espace où se déroulent les phénomènes biologiques demande à être défini.

ESPACE DE CONFIGURATION

ESPACE DE HILBERT

Espace vectoriel* de fonctions de carré intégrable sur tout le domaine de définition de la variable.

Généralisation du concept d'espace vectoriel muni d'un produit scalaire* des vecteurs dans le cas de dimension* infinie. Concept issu de l'étude de la décomposition des fonctions en une série* de fonctions de base orthogonales*. Devenu progressivement un des concepts clé des mathématiques, il trouve une utilisation massive dans différents domaines de la physique mathématique* et théorique*.

ESPACE DE HILBERT EQUIPE (Triplet de Gelfand) (Rigged Hilbert space)

Espace plus grand qu'un espace de Hilbert* contenant en plus de fonctions* des distributions*. C'est le véritable espace des états* de la mécanique quantique.

ESPACE DES IMPULSIONS

ESPACE DE PHASE

Espace mathématique dont les points sont les états* d'un système dynamique*.

Dans le cas le plus simple de particules en mouvement c'est l'espace défini par les positions et les impulsions*.

L'espace de phase est le lieu privilégié où s'exprime la dynamique du système, bien plus que l'espace temps ordinaire.

ESPACE INTERNE

Il est apparu souvent naturel d'associer à des paramètres de la physique, autres que la position dans l'espace, une notion d'espace interne, quitte à l'agréger à l'espace ordinaire pour en faire un nouvel espace unique. Un espace interne c'est un ensemble de degrés de liberté. La première démarche dans ce sens a consisté à considérer l'espace-temps* de la relativité comme un espace unique. Les dimensions de l'espace interne autres que les dimensions ordinaires d'espace et de temps sont considérées comme des dimensions internes. Les transformations qui concernent ces dimensions internes ne font pas sortir le système de l'espace temps ordinaire. L'espace produit de l'espace temps ordinaire et de l'espace interne forme un superspace de dimension bien supérieure à 4. La première idée de ce genre apparaît dans l'extension de la relativité générale par Kaluza et Klein (1919) avec l'introduction d'une cinquième dimension. Les tenants de certaines théories spéculatives modernes de la physique comme la supergravité* ou la théorie des cordes* considèrent des espaces de dimensions aussi élevées que 26, 10 ou 11.

C'est dans l'espace interne qu'apparaît la notion de champ de jauge* et que s'établit une relation profonde entre géométrie et physique au moyen d'éléments de géométrie différentielle* comme les fibrés vectoriels.

L'espace défini par le spin isotopique* est l'exemple classique d'espace interne.

Le plan complexe est l'espace interne correspondant à la partie réelle et à la partie complexe d'une fonction d'onde* ; un changement de phase correspond à une rotation dans le plan complexe.

On peut se demander quelle réalité objective présente la notion d'espace interne tout en soulignant que son introduction permet de traiter d'une manière unifiée les propriétés géométrisables du système.

ESPACE-TEMPS

Si l'espace* et le temps* sont les éléments essentiels du cadre où se déploie la physique depuis l'antiquité, il faut attendre la théorie de

la relativité restreinte* pour voir apparaître une entité nouvelle les réunissant, l'espace-temps. La constance de la vitesse de la lumière pour des observateurs inertiels implique un lien entre la position et le temps que concrétisent les transformations de Lorentz*. La position et le temps associés à un événement se transforment simultanément en se mélangeant lorsque cet événement est considéré par deux observateurs en mouvement uniforme relatif. L'espace et le temps deviennent les composantes d'une entité géométrique unitaire, l'espace-temps. C'est cette entité qui est l'invariant fondamental des transformations relativistes, alors que l'espace et le temps se transforment, en se contractant et en se dilatant. L'espace-temps permet une interprétation de la relativité restreinte comme une géométrie* à quatre dimensions où agit le groupe des transformations de Lorentz*.

On peut se demander quelle est la nature physique de cet espace-temps, s'il a une réalité objective ou n'est qu'une simple construction mathématique. Un objet de la nature ou un terme théorique*. Le débat substantialisme* /relationalisme* se réactualise, en particulier avec la théorie de la relativité générale*. Albert Einstein pensait au départ que la relativité générale serait en faveur du relationalisme* généralisé de Mach*

Mais comme la relativité générale traite l'espace-temps comme une entité dynamique avec sa masse-énergie propre, on pourrait penser que cela renforce le substantialisme à la Newton. Les interprétations de la relativité générale* considérant la matière comme une courbure de l'espace-temps ne font qu'augmenter ce sentiment de substantialisme.

En fait de nombreux arguments en faveur du relationalisme* peuvent être reconstruits dans le cadre de la relativité, laissant le débat largement ouvert.

ESPACE VECTORIEL

Ensemble d'éléments (vecteurs*) auxquels s'applique le principe de superposition*, ce qui laisse l'ensemble invariant, c.à.d. ne fait jamais sortir de l'ensemble, tout comme d'ailleurs la multiplication des éléments par des nombres réels ou complexes.

Après la notion de fonction* c'est une des notions les plus importantes des mathématiques. Elle permet en particulier d'étudier la représentation d'un élément (vecteur) en une somme d'éléments de base (vecteurs de base*). Dans les espaces vectoriels de fonctions ceci conduit à la représentation d'une fonction par une série de fonctions élémentaires, ce qui constitue la représentation de Fourier*.

ESPECE

Groupe d'êtres vivants pouvant se reproduire entre eux (interfécondité) et dont la descendance est fertile.

L'espèce est l'entité fondamentale des classifications, qui réunit les êtres vivants présentant un ensemble de caractéristiques morphologiques, anatomiques, physiologiques, biochimiques et génétiques, communes.

L'existence des espèces est un fait biologique relevant de la biodiversité* et obligeant à ne pas pouvoir considérer tout organisme vivant en dehors de son espèce. C'est l'espèce qui est créée ; c'est l'espèce qui évolue.

ESPRIT**ESSENCE**

L'essence est par principe ce qui se trouve au cœur de l'existence*, ce qui se conserve à travers toutes les vicissitudes des phénomènes, ce qui se maintient par delà tous les accidents*. Il y a souvent confusion entre essence et substance*, car il s'exprime là ce qui constitue le fond d'une chose, ce qui fait qu'elle soit (quiddité*).

L'existentialisme* soutient avec Sartre* que l'existence précède l'essence, car seule l'existence est la nature première des choses et des êtres.

ESSENTIALISME**ESTHETIQUE**

Le concept d'esthétique intervient dans des situations variées, et concerne non seulement l'œuvre d'art mais aussi les créations de la nature ou les comportements humains individuels et sociaux.

Traditionnellement on fait commencer l'histoire de l'esthétique comme discipline autonome avec A. Baumgarten (1714-1762) et son ouvrage *Aesthetica* (1750-1758). Mais la notion de beauté ou de perfection a toujours existé, et rien n'empêche, même si l'esthétique n'était pas reconnue comme science, d'en reconstruire une histoire et d'en fournir un tableau pour les époques passées. A preuve des ouvrages fondamentaux comme ceux d'Edgard de Bruyne, Umberto Eco* ou Alexei Losev*. Mais pour dégager les éléments d'une telle entreprise on doit s'appuyer sur une conception même de l'esthétique

constituée seulement à l'époque contemporaine, et adopter une définition précise de ce que l'on considère comme l'esthétique.

L'esthétique n'est pas seulement l'étude de la beauté. Pas plus que l'étude philosophique de la beauté et du goût.

Nous considérerons l'esthétique comme la science générale de l'expression* et de l'expressivité, dans son lien avec le déclenchement d'une émotion ou d'un sentiment. Suivant en cela l'attitude de A.F. Losev* dans sa monumentale « Histoire de l'esthétique antique ». Au risque de voir l'esthétique flirter avec la « Sémiotique visuelle » ou la Sémiotique* en général. Mais pourquoi pas ?

L'esthétique comme doctrine de l'expressivité, occupe par rapport à la sémiotique, doctrine de l'expression (du sens), la même position que les principes optimaux de la mécanique ou le contrôle optimal par rapport à la mécanique. C'est le rôle central de l'optimalité qui distingue le domaine esthétique à l'intérieur de la sémiotique. Il ne faudra pas s'étonner alors de voir l'optimalité jouer un rôle décisif dans la formulation mathématique de critères esthétiques.

Historiquement, la formulation de l'esthétique comme science de l'expression et de l'expressivité, s'impose lorsque l'on cherche à formuler une esthétique pour des œuvres largement situées hors de notre cadre culturel habituel. Nous avons affaire à un terme dont l'usage s'est répandu à partir du moment où le lien qui associait l'art à la « représentation » a commencé à se relâcher. L'intérêt pour les « arts primitifs » n'a pas peu contribué à ce repli stratégique. On peut même se demander si ce n'est pas un mouvement idéologique de fond, lié à une certaine révolte contre la société industrielle ainsi qu'à un besoin de réévaluer les manifestations de cette société, qui est à l'origine des mutations esthétiques successives de l'art moderne depuis le Symbolisme jusqu'au Minimalisme.

L'esthétique c'est l'expression ou l'expressivité. C'est la science de l'expression en général et pas seulement l'étude de la beauté. C'est l'étude de tous les types possibles de l'expression de l'intérieur par l'extérieur, la science générale de l'expressivité.

L'esthétique ne s'intéresse pas à n'importe quelle expressivité, mais à celle qui s'impose à notre regard, nous fait s'immerger en elle, nous libère de toute autre représentation et déclenche un sentiment, nous la faisant considérer comme un sujet en soi. L'expression esthétique est le sujet d'une expression indépendante, d'un attachement désintéressé. Cette indépendance et ce désintéressement du sentiment esthétique ne contrarie en rien l'aspect utilitaire ou fonctionnel des objets et bien au contraire le renforce. L'aspect

esthétique désintéressé est toujours le résultat et la concentration de relations socio-historiques, en particulier socio-politiques et économiques.

Tout objet en général se présente à nous essentiellement comme un condensat de relations sociales, ce qui ne l'empêche pas d'exister et de se développer objectivement indépendamment de la conscience humaine et des conditions sociales.

Adoptant une démarche marxiste, qui se complait dans le constructivisme social, Losev va au fil des pages de son ouvrage considérer l'esthétique antique comme la doctrine des formes expressives d'une totalité cosmique unique. L'expressivité de ces formes constitue l'esthétique antique.

Chez les Grecs, la découverte de la beauté fut la conséquence immédiate de l'intuition de l'univers, qui se montre dans la splendeur d'un kosmos, c'est-à-dire d'un « bel ordre », d'un système cohérent de parties articulées suscitant un sentiment d'étonnement et d'admiration. L'identité entre le beau et l'ordre* place la beauté d'un objet dans la proportion de sa structure (Cf. Esthétique des proportions*).

Il faut évoquer la question centrale de l'ontologie* de l'œuvre d'art et de l'objectivité* des qualités esthétiques. Qu'est ce qu'une œuvre d'art dont on pourra chercher à évaluer la nature esthétique ? Est ce la question esthétique qui définit l'œuvre d'art ? Le sentiment esthétique est il la conséquence d'une réalité physique objective ou une pure construction mentale ? Ou peut être ni l'un ni l'autre ?

Ce dernier débat était déjà ouvert au XVIII^{ème} siècle entre les philosophes anglais de l'art (philosophes empiristes comme Shaftesbury, Hutcheson, Hume, Burke) et l'esthétique rationaliste continentale (Leibniz*, Wolff, Baumgarten).

Pour Leibniz la beauté représente l'unité dans la variété. C'est à dire qu'il y a beauté chaque fois que le jugement saisit un rapport harmonieux entre des objets. Pour Baumgarten, qui développe en cela des idées de Leibniz et de Wolff, la beauté est une perception de la perfection objective considérée comme la concordance du multiple en une chose, et de ce fait le mode le plus élevé de notre connaissance sensible.

Les empiristes affirmaient que la beauté et le plaisir esthétique résident dans l'activité du sentiment et de l'émotion et n'ont aucun caractère cognitif.

Baumgarten, suivant en cela Leibniz, prétendait que la perception n'est qu'une connaissance confuse, par le biais des images

sensibles. Si bien que quoique la beauté soit révélée par nos sens, cela ne démontre pas qu'elle ne soit pas d'origine cognitive. La beauté à plus affaire avec l'idée rationnelle d'harmonie qu'avec la physiologie des sensations.

Kant* lui même sera d'abord proche des rationalistes (de 1755 à 1763), puis subira l'influence croissantes des philosophes anglais, pour finir par élaborer sa propre doctrine du rapport entre le sensible et l'intelligible dans la « Critique de la faculté de juger » (1790).

En fait Kant applique à la beauté la même démarche transcendantale qu'à l'espace et au temps. La beauté est une forme à priori de la perception sensible, précédant toute connaissance expérimentale. Kant pensait dépasser là aussi l'opposition générale entre rationalistes et empiristes.

Une opposition qui se perpétue dans la philosophie des sciences contemporaine et dans le débat esthétique aujourd'hui, le développement des sciences cognitives apportant de nouveaux éléments au dossier.

Dans une analyse détaillée de la problématique de l'ontologie de l'œuvre d'art, Roger Pouivet, finit par accepter qu'une œuvre d'art est un artefact dont le fonctionnement esthétique détermine la nature spécifique. Ce qui lui permet de rejeter à la fois la conception platoniste de l'œuvre d'art, comme n'existant pas concrètement mais uniquement déterminée par une essence, et la conception nominaliste qui nie toute nature propre à cette même œuvre.

Pour pouvoir espérer formaliser l'esthétique il faut en fait se placer dans un cadre de pensée permettant de formuler le problème. Tout comme pour la linguistique ou la théorie de la couleur on peut chercher à s'insérer dans un cadre cybernétique pour utiliser les outils puissants de la théorie de l'information.

De fait la formalisation de l'esthétique relève d'une modélisation cybernétique de la perception et de la connaissance où l'on distingue un système cérébral (plus ou moins à l'état de boîte noire), des informations entrantes liées en général au monde matériel et des informations émergentes au niveau de la conscience. Lorsque ces informations sortantes posséderont des qualités esthétiques on pourra être tenté de dire que les informations entrantes appartiennent à un objet d'art.

Mais il faut alors distinguer entre les attributs* et les propriétés* de l'objet. Une distinction à laquelle nous sommes habitués la physique, la physique quantique en particulier. L'attribut est une caractérisation ontologique de l'objet. Il appartient à l'objet en propre. Contrairement à ce que semblerait suggérer l'étymologie, la propriété

est une caractéristique phénoménale qui ne se manifeste qu'en présence d'un autre objet (un observateur ou un instrument de mesure). De ce point de vue la physique classique munit en général les objets d'attributs, alors que la physique quantique formalise plutôt des propriétés. Le problème de la couleur* montre clairement que celle-ci est une propriété* des objets qu'il n'est pas aisé de rattacher à des attributs*, car la perception* de la lumière et de la couleur est un phénomène psycho-physiologique complexe. Les signaux objectifs qui entrent dans le cerveau via l'œil (composition spectrale.....) émergent comme des couleurs au niveau de la conscience.

Les propriétés esthétiques posent le même problème.

On dit à tort qu'un objet est rouge. Rouge n'est pas un attribut* mais une propriété*.

On dit à tort qu'un objet est beau ou est une oeuvre d'art. Beau n'est pas un attribut* mais une propriété*.

A la différence de la lune qui existe lorsque l'on ne la regarde pas, l'oeuvre d'art n'existe que lorsque l'on la regarde, même si un tableau continue d'exister matériellement lorsque le Musée du Louvre est fermé.

Les propriétés esthétiques relèvent avant tout du sens commun, c.à.d. constituent une esthétique naturelle ou naïve.

Les développements récents de la psychologie (théorie de la Gestalt*, psychologie cognitive) et de l'intelligence artificielle* (robotique) ont focalisé l'intérêt sur l'étude de la structure du sens commun, c'est à dire du comportement naturel en l'absence de tout appareil théorique. W. Köhler un des fondateurs de la psychologie de la Gestalt* déclarait qu'il n'y a qu'un seul point de départ pour la psychologie, tout comme pour les autres sciences : le monde tel que nous le trouvons, de façon naïve et non critique. Cet intérêt pour la perception pure envahit toute la philosophie au XX^{ème} siècle, de Mach* et de la Gestalt à la phénoménologie* (Husserl*, Heidegger*, Merleau-Ponty*). C'est dans ce cadre qu'il faut considérer les propriétés esthétiques. Tout en comprenant bien que c'est là que se trouvent les éléments de toute esthétique formelle, qui se trouvent dans la réalité historique porteurs d'habits de circonstance idéologiques ou philosophiques. Quelle que soit la culture envisagée, n'est pas esthétique n'importe quoi. Il y a sous le vernis historique des grands invariants de l'esthétique . C'est précisément à les mettre en relief que s'attelle toute tentative de formulation mathématique de l'esthétique.

La satisfaction esthétique et le sentiment de plaisir à la vision d'une œuvre recouvrent des expériences diverses qui fusionnent plus ou moins pour sous tendre l'exclamation : « C'est beau ».

Cependant la propriété esthétique la plus naturelle est attachée à un sentiment d'intelligibilité explicite ou diffuse. La confusion ou l'incompréhension ne sont pas naturellement la cause d'un plaisir esthétique normal.

Ce sont essentiellement différentes conceptions de l'intelligibilité qui sont à l'origine des différentes catégories conceptuelles de l'esthétique.

Depuis les Grecs l'intelligibilité est associée à l'ordre et à la symétrie. L'ordre et la symétrie s'incarnent dans le nombre et les proportions, et transcendent la réalité terrestre en manifestant une œuvre divine. Intelligibilité, esthétique, transcendance et mystique font bon ménage. C'est le cas chez les pythagoriciens, c'est évident chez Platon (Timée). Plotin et le néo-platonisme relayent ce sentiment vers la culture chrétienne occidentale.

Le néo-platonisme par ailleurs contribue fortement à assimiler intelligibilité et unité. Tout procède de l'Un, y compris la beauté. L'Un et la Beauté sont synonymes et traduisent l'harmonie divine. Toute beauté peut être considérée comme une théophanie, manifestation divine dans un phénomènes naturel.

Au Moyen Age, la beauté réside dans la manifestation de l'intelligibilité du divin. U. Eco écrit : « Le goût médiéval n'avait affaire ni avec l'autonomie de l'art, ni avec l'autonomie de la nature. Il impliquait plutôt une appréhension de toutes les relations, imaginaires et supranaturelles, établies entre l'objet contemplé et un cosmos ouvert sur le transcendant. Il signifiait le discernement dans l'objet concret de la réflexion ontologique et de la participation de l'être et du pouvoir de Dieu ».

Le fameux quadrivium médiéval : arithmétique, musique, géométrie et astronomie, assemble quatre disciplines qui sont censées produire une ascension de l'âme. Ascension recherchée avant tout par la musique, qui selon Boethius participe à l'unification de l'univers. La musique permet à l'âme de participer au divin et l'âme s'adapte aux proportions de l'univers par l'exercice de la mimesis*, qui est l'intelligibilité des choses de ce monde par leur conformité aux choses divines. Tout comme chez Platon la beauté est l'intelligence du reflet de la forme dans l'objet de ce monde. Les mathématiques sont pour lui un intermédiaire dans l'ascension vers les Formes*.

Aux Temps Modernes l'intelligibilité prend le visage de la rationalité*, sous l'influence du développement des sciences.

Rationalité qu'incarnent à nouveau les mathématiques. Une rationalité à l'œuvre depuis longtemps dans la théorie de la musique, une rationalité source de l'harmonie.

La musique baroque manifeste au plus haut point cette esthétique de la rationalité. Une rationalité des passions formulée par Descartes et incarnée par J.S. Bach. Une esthétique à la mesure de l'ordre dans le monde révélé par Galilée et Newton. Une esthétique de l'ordre confortée par la montée en puissance des monarchies européennes.

Tous les penseurs et mathématiciens de Descartes à Leibniz, de Gassendi à Euler voient dans la musique l'expression d'une esthétique rationnelle architecturée par les mathématiques.

Le rationalisme est à l'œuvre dans la musique baroque à travers la doctrine des affections, selon laquelle les émotions humaines sont intelligibles par catégorisation en stéréotypes clairs et distincts, comme la joie, la colère, l'amour, la haine... Ces émotions sont traduisibles en motifs musicaux, que le compositeur combine pour traduire ses sentiments. La nature statique et schématique de ce système et le fait que c'était là un produit typique de l'environnement rationnel du XVII^{ème} siècle est justement remarqué par Bukofzer, historien de la musique baroque. Il écrit : « les moyens de la représentation verbale dans la musique baroque n'étaient pas directs, psychologiques ou émotionnels, mais indirects, c'est à dire intellectuels et imagés. ». La composition musicale était un processus intellectuel plutôt qu'une expression intuitive de l'émotion. L'attention était dirigée vers la manipulation de règles et de mots, et par la traduction rationnelle d'idées extra musicales par la notation musicale. Jacop Opper ajoute : « La doctrine des affections constitue la rhétorique musicale du baroque. C'est un vocabulaire systématique qui a son origine d'une part dans l'ancien art oratoire et dans ses figures linguistiques, et d'autre part dans la psychologie mécaniste du 17^{ème} siècle. » .

Une telle rigueur du système des formes s'exprime aussi dans la tragédie classique, genre littéraire pilote de l'âge baroque.

« La juste cadence imposait au discours la double symétrie de la césure et de la rime, et le regard du roi placé au point de perspective ordonnait tout le spectacle en suivant l'axe central du théâtre »

Michel Baridon. Les deux grands tournants du siècle des lumières. .

L'esthétique des raisons est donc une esthétique de l'intelligibilité mécaniste.

En écrivant le célèbre article « Beau » de l'Encyclopédie en 1753 Diderot ne se démarque pas de ce rationalisme baroque, tout en tentant de le justifier comme une donnée naturelle.

« Voilà donc nos besoins et l'exercice le plus immédiat de nos facultés, qui conspirent aussitôt que nous naissons à nous donner des idées d'ordre, d'arrangement, de symétrie, de mécanisme, de proportion, d'unité.... »

Et pourtant l'Esprit du Siècle a déjà changé.

Au mécanisme strict succède une conception plastique des phénomènes de la nature et de la pensée. C'est que la mécanique n'est plus la science dominante (avec l'astronomie) et que les sciences de la vie s'avancent sur le devant de la scène. La mécanique elle-même se transforme ; la formulation au XVIII^{ème} siècle de principes variationnels (Maupertuis) met l'optimalité au cœur de la mécanique au dépens de l'ordre rigoureux des équations du mouvement. Au principe de simplicité incarné par l'ordre ou la symétrie, succèdent des conceptions faisant part à l'optimalité ou à la perfection. A l'affirmation d'une rigueur succède la mise en place d'une dialectique, d'un compromis.

Locke, Buffon, Linné, Boyle, Lavoisier sont les figures marquantes de ce siècle de l'histoire naturelle, de la botanique, de la physiologie et de la chimie.

A la rigueur des formes l'esthétique de ce siècle sensible substitue l'intelligibilité du foisonnement et de la richesse des formes, ce qui s'exprime naturellement par un compromis entre variété et mise en ordre.

Francis Hutcheson, célèbre philosophe de l'esthétique, formule en 1725 une telle dialectique des tendances contraires.

« Les figures qui suscitent en nous les idées de beauté semblent être celles où l'on trouve une uniformité au sein de la variété. Ce que nous appelons beau dans les objets, pour s'exprimer dans un style mathématique, semble résider dans un rapport composé d'uniformité et de variété. »

Leibniz, qui en matière d'esthétique s'en tenait à la réalisation de l'unité par l'accord des proportions entre composants, avait pourtant formulé des idées sur l'optimalité sans les appliquer à l'esthétique.

Leibniz est au tournant d'une révolution conceptuelle considérable qui va mener jusqu'à la formalisation mathématique de l'esthétique (Cf. Esthétique mathématique*).

A l'ordre Leibniz substitue l'intelligibilité par la simplicité.

« Pour ce qui est de la simplicité des voyes de Dieu, elle a lieu proprement à l'égard des moyens, comme au contraire la variété, richesse ou abondance y a lieu à l'égard des fins ou effects. Et l'un doit estre en balance avec l'autre, comme les frais destinés pour un bastiment avec la grandeur et la beauté qu'on y demande. Il est vrai que rien ne couste à Dieu, bien moins qu'à un Philosophe qui fait des hypothèses pour la fabrique de son monde imaginaire, puisque Dieu n'a que des décrets à faire, pour faire naistre un monde réel ; mais en matière de sagesse les decrets ou hypothèses tiennent lieu de dépense à mesure qu'elles sont plus indépendantes les unes des autres : car la raison veut qu'on évite la multiplicité dans les hypothèses et principes, à peu près comme le système le plus simple est toujours préféré en Astronomie. »

Leibniz en fin connaisseur de la philosophie scholastique se fait là l'écho de Guillaume d'Ockham, qui avec son fameux « rasoir » disait qu'il ne fallait pas faire d'hypothèses complexes là où l'on pouvait en faire de simples. Mais la grande originalité de Leibniz est de mettre en balance dialectique la simplicité des moyens avec la richesse des fins. La simplicité des moyens rentre pour ainsi dire dans le calcul de l'optimum.

«non seulement rien n'arrive dans le monde, qui soit absolument irregulier, mais on ne sçaurait memes rien feindre de tel. Car supposons par exemple que quelcun fasse quantité de points sur le papier à tout hazard, comme font ceux qui exercent l'art ridicule de la Géomancie, je dis qu'il est possible de trouver une ligne géométrique dont la motion soit constante et uniforme suivant une certaine règle, en sorte que cette ligne passe par tous ces points, et dans le même ordre que la main les avoit marqués. Et si quelcun traçoit tout d'une suite une ligne qui seroit tantost droite, tantost cercle, tantost d'une autre nature, il est possible de trouver une notion ou regle ou equation commune à tous les points de cette ligne en vertu de la quelle ces mêmes changements doivent arriver. Et il n y a par exemple point de visage dont le contour ne fasse partie d'une ligne Geometrique et ne puisse estre tracé tout d'un trait par un certain mouvement réglé. Mais quand une regle est fort composée, ce qui luy est conforme passe pour irregulier. Ainsi on peut dire que de quelque maniere que Dieu auroit créé le

monde, il auroit toujours été régulier et dans un certain ordre general. Mais Dieu a choisi celui qui est le plus parfait, c'est à dire celui qui est en même temps le plus simple en hypotheses et le plus riche en phenomenes, comme pourroit estre une ligne de geometrie dont la construction seroit aisée et les proprietes et effects seroient fort admirables et d'une grande étendue. »

Si c'est là le meilleur des mondes possibles s'étonne Candide, alors à quoi ressemblent les autres. L'horreur n'est elle déjà pas à son comble ! Voltaire n'a pas peu contribué à rendre célèbres les thèses de Leibniz tout en les travestissant. Car l'essentiel n'est pas dans une optimalité absolue mais dans l'optimalité qui s'exprime par la dialectique variété/simplicité.

Il semble que la trop grande richesse de la réflexion philosophique de Leibniz ait empêché les commentateurs de donner à ce texte l'importance qu'il mérite, à la lumière en particulier des théories actuelles de la complexité* et de la calculabilité*, qui ouvrent la voie à une esthétique mathématique*.

Très récemment sont apparues des démarches que l'on regroupe sous le nom de neuroesthétique. C'est un phénomène important bien décrit par Jacques Morizot :

« Avant toute autre démarche, je pense qu'il convient de replacer la neuroesthétique dans un cadre plus large qui témoigne d'une inflexion profonde de toute la pensée contemporaine : je veux bien sûr parler des programmes de naturalisation de la connaissance, des valeurs et de l'intentionnalité. Au point de départ, il y a l'épistémologie naturalisée de Quine à partir de laquelle ils ont diffusé de proche en proche avec plus ou moins de succès dans tous les secteurs de recherche. Marqués à l'origine par l'élimination behavioriste des contenus mentaux, ils ont cherché à rendre compte de la signification sur la seule base de régularités psychobiologiques,

(leur aboutissement moderne est la sémantique informationnelle de Dretske) et ils se développent désormais dans un cadre représentationnel caractéristique du type de conceptualisation des sciences cognitives. (Cf. Naturalisme)*

Parallèlement le centre de gravité de l'esthétique s'est déplacé de la philosophie du langage qui lui a fourni pendant une bonne part du XXe siècle ses méthodes d'analyse (et parfois son idéologie, dans ce qu'on a appelé le structuralisme) vers la philosophie de l'esprit qui privilégie le niveau psychologique et les conduites de réception. L'idée d'une grammaire des oeuvres cède le pas à une compréhension des modalités de saisie et de traitement d'une information sensorielle, dans un va-et-vient entre perception et action puis entre réception et réélaboration conceptuelle. L'emprise du formalisme recule et du même coup la réduction hégélienne de l'esthétique à la philosophie de l'art cesse d'aller de soi. On assiste au contraire au retour en force de thèmes en apparence plus traditionnels, comme la beauté, le plaisir, les préférences subjectives ou culturelles et de manière générale les modalités des attributions de croyance relatives à des conduites qui ne sont pas strictement sous la dépendance de l'utilité la plus immédiate.*

Le sens de la neuroesthétique en tant que projet épistémologique me semble se placer au point d'articulation de ces deux évolutions. Elle prolonge l'entreprise de naturalisation en lui apportant les ressources du niveau neuronal, les techniques de localisation et d'imagerie cérébrale, et en même temps elle impose des contraintes instrumentales et fonctionnelles plus strictes sur l'examen de l'activité esthétique »

On peut affirmer que l'esthétique appartient aux stratégies cognitives. Celles-ci sont caractérisées par leur capacité d'abstraction face aux perpétuels changements du monde afin de dégager le général du particulier. L'abstraction est une caractéristique des différentes aires visuelles du cerveau. Elle libère le cerveau de l'attachement au particulier, et le préserve des imperfections de la mémoire. Ceci se reflète dans l'art qui est de toute façon une activité abstraite.

ESTHETIQUE DES PROPORTIONS

Le Timée de Platon* est certainement la plus ancienne source écrite où apparaissent des raisonnements sur les proportions qui constituent le cadre où plus tard, en particulier chez Euclide*, sera formulée la notion de section dorée.

Du point de vue de l'esthétique Platon s'inscrit dans la tradition pythagoricienne de l'étude des proportions. Mais il faut bien préciser

que le mot *proportion* nous vient ici de Cicéron, qui a traduit en latin le *Timée* au 1^{er} siècle après J.C., et rendu le terme platonicien *analogia* par le latin *proportio*. Traduction heureuse car l'analogie platonicienne c'est fondamentalement l'égalité de deux rapports. Mais il ne faut pas que cette formulation mathématique vienne cacher le sens profond de l'*analogia* qui est la ressemblance. Cette ressemblance entre les formes sensibles et les formes intelligibles, entre les choses et les idées, qui constitue la clef de voûte de toute la pensée platonicienne. L'esthétique platonicienne est d'ailleurs une esthétique de la participation du sensible à l'intelligible, qui sera portée à son paroxysme par les néo-platoniciens*.

Quant au terme latin *analogia*, il va, en particulier à l'époque médiévale, finir par désigner une problématique de l'ambiguïté et de l'équivoque. Si l'analogie platonicienne est une doctrine de la certitude, exprimée par la géométrie, l'analogie médiévale, comme en un sens l'analogie* moderne, renvoient à la vraisemblance, concept éminemment probabiliste. L'analogie s'insère dans les démarches inductives ou dans les procédés de simulation.

Une longue analyse du texte du *Timée* de Platon, permet de conclure que si l'on pose la question de savoir si Platon définit le concept lui même de *proportion* comme une forme esthétique abstraite, la réponse est totalement négative. On ne trouve chez Platon aucune théorie esthétique des proportions en tant que proportions.

Il ne semble donc pas qu'il faille attribuer à la tradition pythagorico-platonicienne une expression mathématique explicite d'une esthétique des proportions. Même si dans « *La Métaphysique* » (M3, 1078a30) Aristote* déclare :

« Les formes les plus hautes du Beau sont l'ordre, la symétrie, le défini, et c'est là surtout ce que font apparaître les sciences mathématiques ».

Dans ces conditions les multiples affirmations de la littérature sur l'emploi du nombre d'or* ou de la section dorée dans la façade du Parthénon sont autant de plaisanteries, mises en place par d'habiles manipulations des dimensions de l'édifice. Le livre de E.H. Huntley qui constitue une source classique sur le nombre d'or* ne se prive pas de cette fantaisie gratuite.

Tout au plus peut on remarquer qu'au théâtre d'Epidaure (IV^o siècle av J.C.) il y a 55 gradins répartis en deux séries de 34 et 21

rangs. Trois nombres successifs de la série de Fibonacci* dont les rapports sont très proches du nombre d'or. Mais les grecs ne le savaient pas. Et ils n'avaient pas les concepts permettant de passer librement de l'arithmétique à la géométrie.

On peut sans doute dire la même chose des cas avérés de connaissance de la série de Fibonacci pour des raisons pratiques calculatoires. C'est le cas en Inde au Moyen-Age . La première affirmation connue du rapport entre série de Fibonacci et division en extrême et moyenne raison date d'une lettre de Kepler* de 1608 .

Il y a de la part de l'époque moderne, et plus récemment encore sous l'influence d'écrits comme ceux de Mathyla Ghyka , une distorsion des conceptions pythagorico- platoniciennes par des considérations formalistes du nombre qui n'ont de sens qu'à partir du XVII ème siècle. C'est une vision moderniste de l'arithmétique et de la géométrie qui alimente les spéculations sur le rôle esthétique du nombre d'or.

Des auteurs aussi informés qu'Edgard de Bruyne ou Umberto Eco , tout en décrivant des esthétiques de la proportion au Moyen-Age, prennent de nombreuses précautions vis à vis de telles interprétations modernistes.

Ainsi E. de Bruyne, exposant la doctrine de Boèce, avertit qu'il ne « se laissera pas influencer par les hypothèses modernes sur la Section d'Or ou par les discussions sur son caractère géométrique ou arithmétique ».

Et U. Eco, dans un paragraphe sur l'Ecole de Chartres, relais important de la pensée du Timée dans l'occident médiéval, remarque que :

« Dans cette conception, on note que déjà la rigidité des déductions mathématiques se trouve tempérée par un sentiment organique de la nature. Ni Guillaume de Conches, ni Thierry de Chartres, ni Bernard Sylvestre ou Alain de Lille ne nous parlent d'un ordre mathématique inerte ; ils nous parlent en revanche d'un processus organique dont nous pouvons toujours réinterpréter la croissance en remontant à l'Auteur : en voyant dans la seconde Personne de la Trinité la cause formelle, le principe organisateur d'une harmonique esthétique dont le Père constitue la cause efficiente et dont l'Esprit Saint est la cause finale, amor et connexio, anima mundi. Ce n'est pas le nombre, c'est la nature qui est régente de ce monde (Regula Mundi selon Alain de Lille) ».

Si on remplace la Trinité par les quatre éléments, Platon ne disait pas autre chose. On est bien loin d'une esthétique mathématique.

Dans une magistrale étude des façades des cathédrales, Thierry de Champis est obligé d'avouer que : « Si l'on cherche les rapports simples selon lesquels sont étagés les axes horizontaux majeurs d'une façade gothique, on ne trouve rien. Pas même de rapport Φ (le nombre d'or). »

Cependant exceptionnellement, il note que : « A Amiens, la distance AF qui mesure l'espace entre axes du portail central et des portails latéraux est divisée suivant le nombre d'or pour implanter les contreforts C et C' qui marquent à l'extérieur la largeur de la nef ». Ce qui traduit tout au plus l'emploi de constructions géométriques, où comme dans l'architecture d'Asie centrale, le nombre d'or peut accidentellement se glisser. Mais pas de trace de son emploi systématique et délibéré.

Il serait à nouveau tout à fait anachronique et mystifiant de tirer argument de ce que les constructeurs de cathédrales utilisaient une pige constituée de cinq tiges, correspondant chacune à une unité de mesure de l'époque, relatives au corps humain et exprimées en nombre de lignes (environ 2mm) :

La paume 34 lignes

La palme 55 lignes

L'empan 89 lignes

Le pied 144 lignes

La coudée 233 lignes

Ces cinq nombres font partie de la suite de Fibonacci : 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377.....mais il faudra attendre le XVII^e siècle pour savoir que le rapport entre deux termes successifs tend vers le nombre d'or.

Et pourtant tout au long des siècles, avec des appellations variées, on trouvera réaffirmé l'idéal d'une esthétique des proportions mais sans véritable formulation quantitative, à fortiori mathématique.

Les grecs, pour nommer la beauté, utilisaient des termes qui désignaient la disposition, l'arrangement ou l'ordre des parties :

symmetria pour la beauté visible, harmonia , consonance, pour la beauté audible, ou taxis pour l'ordre.

C'est sans doute chez Plotin* que l'on trouve cette esthétique clairement formulée (Du Beau. Ennéades) : La beauté réside dans « l'accord et la proportion des parties entre elles et avec le tout ».

Mais à part les fractions simples des harmonies musicales, et l'emploi de fractions comme 5/8, 1/8, ou 1/3, on ne trouve pas de chiffres précis des proportions esthétiques.

Platon lui même s'est borné à des affirmations générales : « C'est toujours beau et vertueux de conserver la mesure et les proportions » (Philèbe 64E), « Le laid signifie simplement l'absence de mesure » (Sophiste 228A).

Au 1^{er} siècle avant J.C. Vitruve avait déjà exprimé cela dans le domaine de l'architecture. Nous le donnons dans le texte français du XVI ème siècle ré orthographié :

« La composition des temples consiste en symétrie, de laquelle tous Architectes doivent diligemment entendre le secret. Cette symétrie est engendrée de proportion que les Grecs nomment Analogie.

Proportion est un certain rapport et convenance des membres ou particularités à toute la masse d'un bâtiment et de cela vient à se parfaire la conduite d'icelles symétries.

Or n'y a - t -il ni Temple ni autre édifice qui puisse avoir grace de bonne structure sans symétrie et proportion, et si la convenance n'est gardée en toutes ses parties aussi bien qu'en un corps humain parfaitement formé. »

**De la composition des
maisons sacrées, ensemble des
symétries du corps humain.**

Chapitre I

Le corps humain comme étalon de la beauté, voilà une idée que l'on retrouve partout et de tout temps. Chez Leonardo da Vinci* et Dürer*, dans l'Encyclopédie de Diderot* et chez Le Corbusier avec son fameux Modulor.

Saint Augustin* la formulera pour le monde chrétien : « Quid est corporis pulchritudo, congruentia partium ».

Cette congruence dont parlait déjà Cicéron sous le nom d'aptum.

Saint Augustin affirme avec force : « Toute chose ne plaît que par sa beauté, dans sa beauté par les formes, dans les formes par les proportions, dans les proportions par les nombres » (De ordine. II, 15, 42)

Mais Saint Augustin distingue le beau (pulchrum) comme un en soi absolu, opposé au laid et au difforme, et l'adapté (aptum) qui est relatif- une chose se trouve adaptée par rapport à une autre. L'apte est fondé sur le lien entre les parties et le tout, la beauté est absolue. Bien plus tard Alberti distinguera la beauté des embellissements.

L'absolu de la beauté est bien sûr le reflet de la beauté divine.

Dans ses considérations sur la beauté du monde Augustin subit l'influence des écrivains antiques et des écrivains chrétiens qui soulignaient l'unité et la cohérence de toutes les parties de l'univers et insistaient sur l'unité et l'harmonie du corps humain. La comparaison de l'homme au temple de Dieu était très répandue au Moyen Age. Augustin considérait comme un véritable prodige la correspondance entre l'homme et le monde, doctrine de l'analogie entre le microcosme et le macrocosme, donnant à la considération des proportions un caractère symbolique bien éloigné de toute pensée mathématique. Ainsi on trouve chez Augustin un rapprochement entre les proportions du corps humain et les proportions de l'Arche de Noe (Cité de Dieu XV, 26) qui sont données comme : longueur 300 coudées, largeur 50 et hauteur 30. La taille de l'homme, sa largeur et son épaisseur sont dans les rapports 300:50:30 c'est à dire 1,1/6,1/10.

On retrouvera ces mêmes proportions avec la même analogie avec celles de l'arche au XV ème siècle chez Ganaccio Manetti, décrivant le projet de la basilique Saint Pierre, conçu par L.B. Alberti.

Alberti lui même rapporte ces proportions dans son traité « De re aedificatori » (IX, 7).

Le grand Alberti (1404-1472), artiste et savant, dont André Chastel (16) dit qu'il « élève l'architecture au rang des arts libéraux...à cette intellectualisation, se lie un effort de rationalisation complète : tout dans l'édifice se calcule et s'analyse, le beau est la valeur absolue d'un organisme esthétique, dont rien ne peut être modifié. Cette beauté fait rayonner dans l'âme humaine une joie pure,

suscite un accord irremplaçable entre l'homme et l'univers : par le calcul mathématique, le jeu des proportions, ou en termes empruntés au Timée de Platon, des médiétés... »

Alberti déclare que : « la beauté est un accord ou une certaine conspiration, s'il faut parler ainsi, des parties en la totalité, ayant son nombre, sa finition et sa place, selon que requiert la suscite correspondance, absolu certes et principal fondement de nature ».

Après ces belles paroles, Alberti mathématicien, déclare croire en une profonde unité de la nature au nom de laquelle il adopte une correspondance entre les intervalles musicaux et les proportions en architecture.

« car (certes) ainsi va la chose, considéré que les nombres causans [qui sont la cause] que la concordance des voix se rende agréable aux oreilles, ceulx la sans autres [ceux là seuls] font aussi que les yeulx et l'entendement se remplissent de volupté merveilleuse ».

Et de là vient tout le système des proportions en usage à la Renaissance. Un système de rapports arithmétiques simples, pour des gens qui assimilent encore note musicale et longueur de cordes. Les architectes de la Renaissance cherchent à construire une musique visible. Les proportions musicales exprimant comme une structure interne universelle on cherche à les transposer dans le domaine cosmologique (musique des sphères célestes), anthropométrique (harmonie du corps humain), alchimique et ésotérique, et bien sur architectural. Nous voilà renvoyés à Platon et à Pythagore.

A peine un siècle plus tard, Palladio ne procédera pas autrement.

Il est peu probable dans ces conditions que toutes ces esthétiques des proportions aient fait usage de nombres irrationnels (à fortiori du nombre d'or).

Ainsi en l'absence de véritables règles mathématiques définissant l'esthétique des proportions, on doit reconnaître qu'il s'agit là bien souvent d'un discours général plutôt que de formules opératoires. On ne peut ainsi qu'être d'accord avec U. Eco :

« Ainsi semble-t-il, à tous les siècles on a parlé de la Beauté de la proportion, mais selon les époques, en dépit des principes arithmétiques et géométriques affirmés, le sens de cette proportion a changé. Assurer qu'il doit y avoir un juste rapport entre la longueur des doigts et la main, et entre celle ci et le reste du corps, c'est une chose ; déterminer le bon rapport était une affaire de goût qui pouvait évoluer au fil des siècles. Et en effet, il

y a eu divers idéaux de la proportion. La proportion des premiers sculpteurs grecs n'était pas la même que celle de Polyclète, les proportions musicales de Pythagore n'étaient pas celles de médiévaux, car la musique qu'ils estimaient agréable était différente....

Les bâtisseurs de cathédrale suivaient un critère proportionnel bien à eux, différent de celui de Palladio. Pourtant de nombreux spécialistes contemporains ont tenté de démontrer que les principes d'une proportion idéale, y compris la réalisation du nombre d'or, se retrouvent dans les œuvres de tous les siècles, même quand les artistes ignoraient les règles mathématiques correspondantes. Si on conçoit la proportion comme règle rigoureuse alors on s'aperçoit qu'elle n'existe pas dans la nature, et que l'on peut rejoindre les argumentations de Burke au XVIII^e siècle, qui nie que la proportion soit un critère de Beauté ».

Au XVIII^e siècle en effet on établit la différence qui existe entre la physiologie de la vue et la physiologie de l'audition, ce qui contribue à discréditer les analogies entre les proportions musicales et les proportions géométriques visuelles.

En fait il y a longtemps déjà que l'esthétique des proportions n'est plus dominante. Plotin est le premier à l'avoir mis en cause, arguant du fait que des choses simples, donc sans composition, peuvent être belles. Telles le soleil, la lumière ou l'or, dont la beauté réside dans l'éclat.

L'esthétique médiévale a souvent suivi Plotin. Ainsi Pseudo-Dyonisius* (De divinis nominibus IV, 7) formule le double critère de la beauté comme « proportio et claritas ». Il est suivi par Robert Grossetete qui tout en décrivant la beauté comme proportion, maintient que la beauté de la lumière « n'est pas basée sur le nombre, la mesure, le poids ou quoique ce soit de semblable, mais sur la vue » (Hexaemeron 147,V) . Position adoptée par Thomas d'Aquin* dans la Summa Theologica : « Pulchrum consistit in quadam claritate et proportione ».

Position soutenue par l'Académie Platonicienne de Florence, dont le chef Marsile Ficin remarquait : « Certains regardent la beauté comme un arrangement des parties composantes, ou pour utiliser leur langage comme la commensurabilité ou la proportion.....Nous n'acceptons pas ce point de vue car ce type de disposition ne se produit que dans les corps composés et les choses simples ne pourraient donc

pas être belles. Et pourtant les couleurs pures, les lumières, les sons individuels, l'éclat de l'or et de l'argent, le savoir, l'âme, sont pures et simples et néanmoins belles ». (Convivium V,1).

Une certaine reviviscence de l'esthétique des proportions apparaît au XIX^e siècle avec l'esthétique du nombre d'or*.

ESTHETIQUE MATHEMATIQUE

Méthodologiquement le problème de l'esthétique mathématique est celui du beau ordinaire et semble analogue à celui de l'information* selon Shannon. Mathématiser la beauté comme on a mathématisé l'information. Réduire la beauté à une structure des faits.

Il s'agit d'un beau syntaxique dénué de toute connotation sémantique. On doit pouvoir réussir à son sujet la même disjonction, centrale dans la théorie de Shannon, entre le signe* et le sens*.

Le beau ordinaire s'intéresse à la configuration du signal* et ignore son contenu signifié*.

Il est l'objet de l'esthétique mathématique qui trouve aujourd'hui une expression précise dans le cadre de la théorie de la complexité*.

Depuis le milieu du XIX^e siècle un certain nombre de théories ont réussi à opérer des disjonctions fondamentales entre la forme* et le contenu. La logique* mathématique tout d'abord, avec les conséquences que l'on connaît pour les mathématiques, la linguistique ensuite avec sa répercussion sur la sémiotique*, la théorie de l'information* enfin qui ne s'intéresse pas au sens mais se concentre sur la configuration des signaux. On peut dire qu'il y a chaque fois tentative de formuler une doctrine structuraliste*, privilégiant les structures aux dépens des objets. Nombreux sont les théoriciens de l'esthétique* qui rêveraient d'une telle approche dans le domaine de l'art et de l'esthétique en général. C'est sans doute là l'enjeu de ce que l'on appelle la définition d'une beauté ordinaire, débarrassée de toutes ses connotations sémantiques. Un problème qui se retrouve aujourd'hui dans une problématique à la mode, celle de la simplicité* et de la complexité*, et dans les nombreuses tentatives de les exprimer dans le cadre de la théorie de l'information.

Que la beauté soit un compromis entre le pouvoir de l'imaginaire et la restriction de la raison est une idée diversement formulée par de nombreux philosophes, à commencer par Kant. La théorie de l'information et de la complexité permet de formuler de manière mathématique cette dialectique entre la surprise et l'intelligibilité, l'innovation et la lisibilité, en utilisant en fait les deux

types les plus connus de complexité, la complexité aléatoire* de Kolmogorov* et la complexité organisée* de Bennett. La beauté mathématisée, beauté ordinaire s'il en est, apparaît comme un compromis entre le désordre, évitant la banalité de l'ordre répétitif, et l'ordre introduit par la formulation raisonnable.

Le problème des rapports entre beauté, harmonie et propriétés mathématiques a été largement posé et illustré dans l'Antiquité. Les fondements d'une démarche faisant jouer un rôle central aux proportions, aux relations numériques, aux propriétés de symétrie* sont élaborés dans la "pensée pythagoricienne" et relayés par le platonisme vers la culture occidentale.

Le rôle, contesté ou non, du nombre d'or*, l'utilisation des tracés régulateurs par les peintres, les problèmes de la perspective*, et la pratique et la théorie de l'architecture sont les manifestations les plus connues de recettes mathématiques pour l'obtention de la beauté.

Il y a là un immense domaine où l'art et la mathématique se côtoient, s'observent, se fécondent mutuellement. Ce domaine s'enrichit de siècles en siècles des progrès des mathématiques et de la pratique des artistes.

Brillamment illustrée par Albrecht Dürer et Leonardo da Vinci cette synergie entre art et science va souffrir de l'isolement progressif des deux domaines, au point de ne pas constituer aujourd'hui une zone bien explorée et bien intégrée de la culture.

Néanmoins les besoins de l'informatique et de l'intelligence artificielle sont en passe de remettre au premier plan la mathématisation de l'art, de l'image numérique à la musique informatique. Mais l'éducation générale dans ce domaine, reste totalement à développer. Il y a là des niches prodigieusement riches pour l'enseignement parallèle de l'art et des mathématiques.

Cet enseignement s'il était développé devrait révéler que l'art ne fait pas tant appel à la précision numérique ou logique des mathématiques qu'à ces aspects moins connus et plus délicats que l'on pourrait globalement appeler, "les mathématiques qualitatives". Marquant par là, après tant de siècles, le retour en force du qualitatifisme d'Aristote, dont le grand mathématicien René Thom s'est fait l'apôtre. Très sommairement caractérisé ce mouvement peut être appelé "la disparition du nombre au profit du paysage".

Entre l'art et les mathématiques, le rapport est le même qu'entre la physique et les mathématiques. Une modélisation sans cesse battue en brèche par la réalité. Ce n'est pas le monde qui est mathématique, c'est notre esprit qui cherche à l'être. C'est nous qui cherchons à

enserrer le désordre du monde dans le filet de l'ordre des mathématiques. Avec plus ou moins de bonheur.

Si bien qu'en définitive l'art comme les mathématiques nous apprennent plus sur nous-mêmes et notre esprit que sur la Nature. En cherchant à mesurer la beauté, on cherche en fait à caractériser la lisibilité. C'est là l'intérêt des discours sur l'art en terme de complexité ou d'entropie. Des discours qui rencontrent des discours analogues dans les sciences cognitives, en particulier celles de la perception. Une certaine unité de pensée et de formalisation se met en place au carrefour des sciences cognitives et des sciences du calcul. Cette démarche rejailit sur les conceptions de l'esthétique.

C'est le grand mathématicien américain G.D. Birkhoff* qui a le premier proposé une mesure mathématique de la beauté.

« L'expérience esthétique type peut être regardée comme renfermant trois moments successifs :

1° un effort préliminaire nécessaire pour bien saisir l'objet, et proportionnel à la complexité (C) de l'objet ;

2° le sentiment du plaisir ou mesure esthétique (M) qui récompense cet effort préliminaire ;

3° ensuite la perception consciente que l'objet jouit d'une certaine harmonie ou symétrie ou ordre (O), plus ou moins caché, qui semble être une condition nécessaire, sinon suffisante, pour l'expérience esthétique elle-même.

Ainsi se pose presque immédiatement la question, de déterminer, dans un cas donné, jusqu'à quel point cette mesure esthétique n'est que l'effet de la densité des relations d'ordre, c'est à dire leur rapport à la complexité. Et ainsi semble-t-il bien naturel de proposer une formule telle que

$$M = O / C$$

Le besoin esthétique bien connu de l'unité dans la variété est évidemment étroitement lié avec notre formule. La définition du beau comme présentant le nombre maximum d'idées dans le minimum de temps, donnée par le hollandais HEMSTERHUIS au XVIII ème siècle, est aussi d'une nature analogue. »

C'est le degré d'organisation comparé à la richesse des faits. Birkhoff n'a pas eu sur ce terrain de continuateurs immédiats. Il faut reconnaître que ses concepts de complexité et d'ordre sont bien intuitifs et vagues. Le français Abraham Moles et l'allemand Max Bense exprimeront une idée voisine en parlant du rapport entre l'originalité et l'intelligibilité, et en formulant le problème esthétique

dans le cadre de la théorie de l'information. Il faudra attendre la seconde moitié du siècle pour que l'apparition des concepts de la théorie de l'information et ceux de la théorie du calcul et de la complexité, suscitent des mises en forme mathématiques plus précises.

La complexité de Kolmogorov, complexité aléatoire*, mesure le degré d'aléatoire de l'objet alors que la complexité temporelle ou complexité organisée*, définie par Bennett, en mesure le degré d'organisation.

On a très justement remarqué que dans la formule esthétique de Birkhoff les deux termes correspondent précisément à ces deux types de complexité.

L'ordre signifie en fait simplicité de la description. Plus l'algorithme descriptif est court plus l'objet présente d'ordre. C'est là la complexité de Kolmogorov.

Quant à la complexité, c'est le temps nécessaire pour engendrer l'objet par l'algorithme minimal. C'est la complexité de Bennett.

Ainsi la formule de Birkhoff représente un compromis entre la longueur d'un programme minimal et le temps d'exécution. C'est la complexité de Levin*. Un compromis entre la richesse (la multiplicité) des faits et leur organisation

Il ne faut cependant pas ignorer que même ces considérations sur la complexité dépendent toujours d'un point de vue d'observateur et que l'on ne sait pas vraiment quel parti choisit la perception. Si bien que l'esthétique mathématique n'est que la formalisation des choix perceptifs du sujet humain et n'instaure pas une véritable ontologie de l'œuvre d'art.

ETANCE

Le fait d'être.

ETANT

Ce qui est. Ce qui existe.

ETAT

L'état d'un système physique est une caractérisation de ce système par l'information* que l'on possède sur lui. L'état définit les caractéristiques de l'objet et non l'inverse. Ce n'est en général pas une caractérisation descriptive des différentes parties du système. C'est en ce sens que l'état ne décrit pas l'être du système. C'est une caractérisation fonctionnelle du système, permettant d'en calculer

l'évolution* et les comportements face aux actions qui s'exercent sur lui.

La notion d'état (du latin stare, se tenir debout) s'oppose initialement de façon ontologique à la notion de processus (Cf. les dérivés, statique, stationnaire*). Cette opposition est battue en brèche par l'idée galiléenne que le mouvement est un état, puis par le développement de l'analyse* qui permet de penser tout processus comme succession d'états instantanés.

L'état, est en général la caractéristique qui intervient dans les équations différentielles fondamentales de la théorie. L'état est le minimum d'information nécessaire pour calculer l'évolution ou prévoir les réactions.. C'est à la fois la mémoire du système et son potentiel futur. L'état contient donc tout ce qu'il faut savoir du passé pour prévoir l'avenir. C'est un ensemble de variables suffisamment riche en information sur le système. Caractériser un système par un état revient à supposer que ce système a un comportement déterministe*, c.à.d. que les trajectoires dans l'espace des états ne se coupent jamais.

Un changement d'état correspond à un changement de notre information sur le système. L'état concentre ce que le système a été et ce qu'il peut être.

Ainsi en Mécanique Classique, l'état d'un système de particules est défini par l'ensemble des positions et des vitesses des particules à chaque instant (Espace de phase*). C'est cet ensemble qui évolue selon les équations de Newton. Seul le présent immédiat intervient, l'évolution passée plus lointaine s'est dissoute dans l'état du moment, mais son information demeure tout en se transformant.

En Mécanique Quantique, l'état d'un système peut être défini par une fonction d'onde* (état pur*) ou par une matrice densité* (état mixte*) qui, en l'absence d'observation, évolue selon l'équation de Schrödinger* ou une équation qui en dérive. C'est l'information que l'on possède sur le système. L'état pur est le maximum d'information que l'on peut avoir sur le système, mais l'information que l'on possède peut être inférieure, ce qui est le cas pour l'état mixte. Mais en présence d'une mesure*, l'état est modifié, car l'on acquiert de l'information. Cette modification n'est pas nécessairement une modification physique réelle du système.

Les physiciens utilisent une notation bien particulière pour représenter un vecteur d'état, au moyen d'un symbole placé entre une ligne verticale et un crochet angulaire (par exemple $|\psi\rangle$). Dans certains cas, le symbole représentera la valeur d'une quantité physique observable Ainsi, le vecteur $|E\rangle$ représente un état où l'énergie est bien

définie et a la valeur E . Cela signifie qu'une mesure de l'énergie dans l'état $|E\rangle$ donnera avec certitude le résultat E .

La notion d'état en M.Q. est caractéristique d'une démarche qui considère le système physique comme une boîte noire* et se limite à donner une caractérisation qui permette de calculer des résultats de mesures possibles lorsque le système est soumis à certaines actions extérieures. La M.Q. est un modèle cybernétique*.

En M.Q. l'état ou la fonction d'onde (représenté par le symbole ψ) n'est pas un attribut* du système mais l'attribut d'une procédure (préparation*). Un système physique tout seul n'a pas d'état. On pourrait être tenté de dire qu'un système préparé par une procédure ψ « se trouve dans un état ψ ». Cependant cette phrase apparemment innocente conduit à des paradoxes chaque fois que l'on effectue une mesure et que l'état est réduit.

La propriété principale d'un état en mécanique quantique est d'appartenir à un espace vectoriel*, un espace de Hilbert* et de satisfaire de ce fait au principe de superposition des états*. L'état participe à une prise en compte des possibilités du système et constitue l'instrument de base du calcul de probabilité quantique. D'une manière générale un état en mécanique quantique est un vecteur d'un espace de Hilbert, dit vecteur d'état se réduisant souvent à une fonction d'onde* (état pur*).

A l'aide d'un ensemble d'états on peut construire de nouveaux états par superposition* (état pur*), par mélange* (état mixte*), ou par somme de produits (état enchevêtré*).

Pour tenir compte de tous les cas possibles d'états on peut avoir recours à une représentation générale de l'état par une matrice densité*.

Sans altérer l'esprit de ce qui vient d'être dit il faut faire remarquer que la formulation de la mécanique quantique requiert en toute rigueur mathématique l'emploi en plus de la notion de fonction* celle de distribution*, et par là même en plus de la notion d'espace de Hilbert* celle d'« espace de Hilbert équipé* » (rigged Hilbert space). Lors de la formulation initiale de la mécanique quantique ces notions n'existaient pas et Dirac a dû y suppléer en utilisant la notion étrange de fonction δ . Ceci a suscité et suscite toujours vis à vis des exposés traditionnels un sentiment de malaise de la part des mathématiciens.

Illustrons par quelques citations de physiciens le caractère abstrait* de l'état en M.Q. Des citations qui témoignent de ce que la

notion d'état est au centre de toutes les interprétations de la mécanique quantique*. Réalité physique ou instrument de prévision ?

Le vecteur d'état n'est qu'une expression abrégée de la part de notre information concernant le passé du système qui se trouve signifiante pour la prédiction du comportement futur-autant que faire se peut.

E. WIGNER* 1963

L'état n'est pas une propriété objective d'un système individuel, mais l'information, obtenue à partir de la connaissance dont le système a été préparé, qui peut être utilisée pour effectuer des prédictions sur les mesures à venir. L'état d'un système classique est une propriété objective et de ce fait ne peut changer que sous l'effet des lois de la dynamique. Un état en mécanique quantique étant un résumé de l'information de l'observateur sur un système individuel se modifie à la fois de par les lois de l'évolution dynamique, et chaque fois que l'observateur acquiert une nouvelle information sur le système par un acte de mesure.

L'état est une construction de l'observateur et non une propriété objective du système. Ou de propriétés de la nature

J.B. HARTLE 1968

La spécification de la manière dont un système physique a été préparé est transcrite dans une fonction d'onde $Y(x)$L'hypothèse métaphysique selon laquelle la fonction d'onde représenterait l'évolution des choses réelles n'est pas raisonnable...La théorie quantique ne contient rien qui puisse être regardé comme une description de qualités ou de propriétés de la nature localisées en un point ou dans des régions infinitésimales du continuum de l'espace temps. Les fonctions d'onde ne sont simplement que des dispositifs symboliques abstraits.

H.P. STAPP 1972

Ainsi le vecteur d'état est beaucoup mieux envisagé comme un élément syntactique utilisé dans l'expression de certaines qualités physiques, et non pas comme un élément de réalité

D. FINKELSTEIN 1972

La fonction d'onde ne donne pas la densité de matière mais plutôt, en calculant le carré de son module, une densité de probabilité. La probabilité de quoi exactement ? Non pas celle de l'électron d'être ici ou là, mais celle de l'électron d'être trouvé là si on « mesure » sa position. Pourquoi cette aversion pour « l'être » et l'insistance sur la « trouvaille » ? Les pères fondateurs ne se faisaient pas une image claire des choses à la lointaine échelle atomique

J. BELL 1990

Le formalisme actuel de la mécanique quantique n'est pas purement épistémologique ; c'est un mélange particulier décrivant en partie des réalités de la Nature, en partie une information humaine incomplète sur la Nature, le tout battu par Bohr et Heisenberg pour en faire une omelette que personne n'a su démêler. Nous pensons que ce démêlage est nécessaire pour toute avancée future de la théorie physique fondamentale. Si nous n'arrivons pas à séparer les aspects subjectifs et objectifs du formalisme, nous ne pouvons savoir de quoi nous parlons, c'est aussi simple que cela.

E. JAYNES 1990

La notion « état quantique » engrange ce qui est connu de par la préparation du système. Un état inconnu est contradictoire dans les termes mêmes.

A. PERES 2003

L'état quantique ne peut être interprété de manière statistique

Les états quantiques sont les objets mathématiques clés de la théorie quantique. Il est cependant surprenant que les physiciens n'aient pas été capables de se mettre d'accord sur ce qu'un état quantique représente. Une des possibilités est qu'un état quantique pur corresponde directement à la réalité. Mais il y'a toute une histoire de suggestions selon lesquelles un état quantique (même un état pur) ne représente qu'une connaissance ou une information d'une certaine sorte. Nous montrons ici que tout modèle où un état quantique représente simplement de l'information sur un état physique sous jacent du système fera des prédictions en contradiction avec la théorie quantique

M. PUSEY, J. BARETT, T. RUDOLPH 2011

J'ai du mal à comprendre ce résultat. Il suggère que la fonction d'onde peut ne pas être interprétée comme une distribution de probabilité à toute fin physique, ce qui rend peu claire l'interaction entre les idées. Je ne suis pas définitivement en train de dire que la fonction d'onde peut être interprétée comme une distribution de probabilité. Je dis juste que des douzaines de choses que les gens font peuvent être utilement faites avec bien d'autres encore. Le fait qu'elles soient si différentes entre elles rend tout ceci tant soit peu mystérieux ; c'est là que réside toute la drôlerie. J'ai trouvé plus claire l'explication de Matt Leifer « L'état quantique peut-il être interprété de manière statistique ? », mais je préfère par-dessus tout le titre de Scott Aaronson « L'état quantique ne peut pas être interprété autrement que comme un état quantique ».

J. BAEZ 2011

Scott Aaronson conclut

L'état quantique ne peut avoir d'autre interprétation que d'être un état quantique

A. Peres avait déjà proclamé que la mécanique quantique n'avait pas besoin d'interprétation.

Toutes ces citations ne font que confirmer le caractère de boîte noire* de la M.Q. Ce que nous retrouvons dans :

Une expérience physique consiste en une procédure physique et en un résultat sous la forme de données. La procédure physique peut souvent être décomposée en une préparation et une mesure. La préparation établit un protocole expérimental en définissant des conditions initiales et des données d'entrée. La mesure couple 'l'objet préparé' à l'appareil de mesure avec pour résultat une observation. 'L'objet' peut être considéré comme une 'boîte noire', un couplage ou un canal d'information entre la préparation et la mesure. Nous dirons que deux préparations représentent le même état si ces préparations ne peuvent pas être distinguées par une mesure quelconque. Ceci implique que l'espace d'état dépende de l'ensemble de mesure considéré. Il est donc trompeur de dire par exemple "l'électron est dans l'état S". Il faudrait plutôt dire "notre connaissance de l'électron est complètement décrite par S". »

Handbook of the Philosophy of Information
(Elsevier. 2006). P. Harremoës et F. Topsoe (The quantitative theory of information)

Ainsi l'état (la fonction d'onde) décrit le dispositif de la boîte noire, c'est à dire un modèle cybernétique* et non pas le système physique. La M.Q. ne décrit pas l'électron mais des expériences physiques sur l'électron. Comme le dit Peres*, l'état quantique n'est pas un objet physique, ce n'est pas l'attribut* d'un système physique, il n'existe que dans notre imagination. Le formalisme quantique ne représente pas l'objet microscopique, il sauve les phénomènes.

Dans l'interprétation statistique* l'état semble prendre une signification physique, ce qui n'apporte pas d'informations ontologiques nouvelles sur l'objet microscopique.

Dans un modèle cybernétique* l'état décrit la boîte noire. Les travaux récents d'axiomatique quantique* montrent que la M.Q. reflète la structure informationnelle de l'expérience microphysique. Piaget* l'avait suggéré il y a longtemps.

René Thom a exprimé le vœu que « Le problème de trouver une liaison entre le formalisme cybernétique et le formalisme différentiel de la dynamique devrait être la tâche essentielle d'une Philosophie Naturelle* ».

ETAT COHERENT (de la lumière).

Etat du champ quantique du rayonnement, pour lequel les valeurs moyennes des champs électriques et magnétiques, ainsi que la valeur moyenne de l'énergie, sont les mêmes que pour les quantités correspondantes dans un état d'un champ électromagnétique classique.

ETAT COMPRIME (de la lumière)

ETAT D'EQUILIBRE

L'état d'équilibre d'un système dynamique, est un état qui ne se modifie pas au cours du temps. Il peut être stable, instable ou indifféremment stable. Le mouvement du système au voisinage de l'équilibre est très différent selon le type d'état d'équilibre.

Dans le cas d'un système à un degré de liberté, si l'état d'équilibre est stable, après une faible perturbation le système revient vers cet état en effectuant des oscillations amorties.

ETAT DE RYDBERG

ETAT ENCHEVETRE

Etat d'un système quantique qui présente une situation d'enchevêtrement*. C'est le cas des systèmes de particules en interaction où l'état global ne peut être représenté comme un simple produit d'états des particules composantes. Il est en général représenté comme une somme de produits d'états. avec permutation des particules. C'est une superposition d'états* macroscopiquement distincts obtenus par l'échange des particules Cette représentation s'impose en particulier dans les cas de particules identiques indiscernables* pour satisfaire au principe de symétrie les concernant.

La nécessité de l'emploi d'un état enchevêtré s'avère expérimentalement vérifiée lors du calcul de l'énergie des édifices atomiques ou moléculaires.

Pour un état enchevêtré, les particules individuelles ne sont pas représentées par des états purs* mais par des états mixtes*.

L'état enchevêtré décrit un état global sans que l'on puisse séparer dans cette description les particules, même si celles ci sont séparables spatialement. Un état de mélange* quantique, à « trajectoires » emmêlées ? Comme on ne peut pas attribuer de propriétés individuelles à chaque particule, il existe des corrélations spécifiques entre le comportement des différentes particules. Corrélations quantiques* qui sont présentes jusqu'aux très grandes distances entre particules bien au delà de la portée des forces ordinaires en particulier électromagnétiques.

Ces corrélations sont en fait responsables de l'identité des édifices à grand nombre de particules (atomes, molécules, corps solides). L'enchevêtrement apparaît comme la propriété quantique la plus importante pour la constitution de l'univers tel qu'il se présente.

Essayons de donner une image de l'état enchevêtré au moyen des feux à un croisement.

Lorsque nous arrivons a un carrefour nous sommes confrontés a deux possibilités : soit le feu est vert, soit il est rouge. Le feu va bien nous apparaître dans deux états, et l'on dit bien "le feu est vert ou rouge". En fait la raison pour laquelle nous passons au vert, et nous arrêtons au rouge, est que nous savons que si le feu est vert pour nous

il est rouge pour les autres, et si il est rouge pour nous, il est vert pour les autres (l'en vert c'est les autres). Le feu est donc bien, pour nous, « a priori », c'est à dire avant qu'on ne le regarde, dans un état enchevêtré

$$| \text{nous, vert} \rangle \times | \text{eux, rouge} \rangle + | \text{nous, rouge} \rangle \times | \text{eux, vert} \rangle$$

Bien sûr nous ne voyons pas un tel état. Ce n'est pas un état du système mais un état de nos connaissances. Précision essentielle.

Pour voir le feu il faut le regarder, et lorsqu'on le regarde, on projette cet état sur un des états factorisés, et le feu devient, par exemple, vert pour nous et rouge pour les autres.

Ainsi l'observation des feux révèle une corrélation à distance qu'explique en fait un dispositif électrique local (une horloge) situé au carrefour. La durée des feux peut être aléatoire.

Mais à la différence des feux rouges qui affichent un attribut* que l'on se borne à constater, en mécanique quantique c'est l'observation* qui crée l'observable* d'une manière aléatoire. Il ne faut pas s'étonner alors que le calcul de probabilité classique ne s'applique pas, et qu'il faille passer par les états pour obtenir des probabilités.

Le problème avec la mécanique quantique est que l'on n'a pas accès à autre chose que les observations. Le « niveau inférieur » ou « le monde sub quantique » nous est inconnu. Le mécanisme des corrélations quantiques nous échappe, même si l'on peut affirmer qu'il a un caractère non-local.

ETAT EXCITE

Etat propre* de l'énergie autre que l'état fondamental*. C'est l'absorption d'énergie (en particulier sous forme lumineuse) qui fait passer de l'état fondamental* à un état excité. Le retour à l'état fondamental s'accompagne de perte d'énergie (en particulier sous forme de rayonnement*).

La mécanique quantique ne fournit pas de description physique des transitions entre états, en accord avec son caractère de boîte noire*.

ETAT DE FOCK (ou ETAT à nombre d'occupation fixé)

Etat d'un champ quantique* (champ électromagnétique ou champ électronique) où le nombre de quanta ou de particules est défini dans chaque mode du champ. Si ce nombre est égal à zéro, on a un état de Fock particulier, l'état de vide quantique*.

ETAT FONDAMENTAL

Etat propre* de l'énergie correspondant à la valeur la plus basse de l'énergie pour un système quantique. C'est l'état qui caractérise le système en l'absence de toute perturbation extérieure. L'état de vide quantique* est un état fondamental.

ETAT MENTAL

ETAT MIXTE

Etat d'un système quantique qui se présente comme un mélange* d'états purs*. On n'est pas très sûr dans quel état on a préparé le système parmi un ensemble d'états purs possibles ou bien on est en présence d'un ensemble statistique de systèmes. Il n'est pas défini comme un ensemble de grandeurs physiques déterminées, mais comme un ensemble de probabilités de voir réaliser un des états du mélange. Il est représenté non par un vecteur d'état* mais par une matrice densité*.

La valeur moyenne d'une observable* dans un état mixte est égale à la somme du produit des différentes probabilités par la valeur moyenne de l'observable pour les différents états purs qui entrent dans le mélange. De ce fait à la différence d'une superposition d'états* il n'y a pas d'interférence entre les états composants, car dans le calcul d'une moyenne ce sont des moyennes qui s'ajoutent et non pas des états.

Comme exemple d'état mixte on peut donner un faisceau de particules non polarisées ou un gaz dans un thermostat.

Le concept d'état mixte joue un grand rôle dans la statistique quantique* et dans la théorie de la mesure*.

ETAT PROPRE

D'une manière générale un état propre d'un opérateur* est un vecteur de l'espace de Hilbert* qui sous l'action de l'opérateur se borne à être multiplié par un nombre réel ou complexe. Ce nombre est

appelé valeur propre* correspondante. C'est une notion très générale de la physique mathématique.

Un système quantique est caractérisé par un état propre pour une observable*(opérateur*) lorsque les résultats possibles des mesures de cette observable ne présentent aucune dispersion* statistique. A un état propre correspond une valeur certaine bien déterminée d'une observable, dite de même valeur propre. Une observable peut posséder de nombreux états propres et de nombreuses valeurs propres associées. Si ce nombre est fini ou infini dénombrable on dit que l'observable possède un spectre* discret ; c'est sous cette forme que la mécanique quantique traduit le phénomène expérimental de la quantification*.

ETAT PUR

Etat d'un système quantique que l'on peut décrire par un vecteur* dans un espace de Hilbert* (fonction d'onde*) ou par une superposition* de vecteurs. Les états d'un système quantique les plus généraux ne sont pas des états purs mais des états mixtes*. Un état pur correspond à une information complète et maximale sur un système quantique. Il est défini par un ensemble complet de grandeurs physiques indépendantes pouvant avoir simultanément des valeurs déterminées. Ainsi l'état d'une particule libre est totalement défini si l'on connaît les trois composantes de l'impulsion* et la projection du spin* sur une direction définie.

ETAT STATIONNAIRE

Etat d'un système physique qui évolue en gardant une valeur constante à certaines grandeurs caractéristiques. Etat d'un processus stationnaire*.

Ainsi les ondes stationnaires*, obtenues par réflexion d'une onde sur un obstacle (phénomène d'interférence*) présentent un ensemble de maxima et de minima d'amplitude fixes dans l'espace.

Pour un système quantique dans un état stationnaire toutes les valeurs moyennes des observables restent constantes dans le temps. Cet état stationnaire est le produit d'une fonction d'espace par une fonction complexe du temps (Séparation des variables). La fonction d'espace est solution de l'équation de Schrödinger* indépendante du

temps et par là même l'état stationnaire est un état propre* de l'énergie.

Dans un état stationnaire un système quantique (un atome par exemple) n'émet pas de rayonnement*. C'est par transition d'un état stationnaire à un autre que le système émet ou absorbe du rayonnement* dont la fréquence* est liée à la variation d'énergie entre les deux états propres par la formule fondamentale

$$E_2 - E_1 = h \nu$$

où h est la constante de Planck*.

La mécanique quantique ne démontre pas cette formule mais l'admet comme principe essentiel de raccord avec la réalité expérimentale. Elle ne fournit d'ailleurs aucune considération sur un état transitoire* possible entre les deux états propres. C'est là une des zones d'ombre les plus marquantes de la mécanique quantique.

ETAT TRANSITOIRE

Tout système physique qui évolue vers un état stationnaire se trouve dans un état dit transitoire. C'est le cas au démarrage d'une évolution ou à l'évolution d'un état stationnaire* à un autre. On parle aussi de régime transitoire pour marquer le fait qu'aucune variable n'est stabilisée ce qui caractériserait l'apparition d'un état stationnaire.

Dans les phénomènes de production du son musical les états transitoires entre les notes jouent un rôle fondamental dans ce que l'on qualifie d'interprétation musicale.

ETENDUE (Encyclopédie)

ETENDUE, s. f. (Ordre encyclopédique, Sens, Entendement, Philosophie, Métaphysique.) On peut considérer l'étendue comme sensation, ou comme idée abstraite; comme sensation, elle est l'effet d'une certaine action des corps sur quelques - uns de nos organes; comme idée abstraite, elle est l'ouvrage de l'entendement qui a généralisé cette sensation, & qui en a fait un être métaphysique, en écartant toutes les qualités sensibles & actives qui accompagnent l'étendue dans les êtres matériels.

La sensation de l'étendue ne peut être définie par cela même qu'elle est sensation; car il est de l'essence des notions particulières immédiatement acquises par les sens, ainsi que des notions intellectuelles les plus générales formées par l'entendement, d'être les dernières limites

des définitions, & les derniers élémens dans lesquels elles doivent se résoudre. Il suffira donc de rechercher auxquels de nos sens on doit rapporter cette sensation, & quelles sont les conditions requises pour que nous puissions la recevoir.

Supposons un homme qui ait l'usage de tous ses sens, mais privé de tout mouvement, & qui n'ait jamais exercé l'organe du toucher que par l'application immobile de cet organe sur une même portion de matière; je dis que cet homme n'auroit aucune notion de l'étendue, & qu'il ne pourroit l'acquérir que lorsqu'il auroit commencé à se mouvoir. En effet il n'est qu'un seul moyen de connoître l'étendue d'un corps; c'est l'application successive & continue de l'organe du toucher sur la surface de ce corps: ce ne seroit point assez que ce corps fût en mouvement tandis que l'organe seroit en repos, il faut que l'organe lui-même se meuve; car pour connoître le mouvement il faut avoir été en mouvement, & c'est par le mouvement seul que nous sortons pour ainsi dire de nous-mêmes, que nous reconnoissons l'existence des objets extérieurs, que nous mesurons leurs dimensions, leurs distances respectives, & que nous prenons possession de l'étendue. La sensation de l'étendue n'est donc que la trace des impressions successives que nous éprouvons lorsque nous sommes en mouvement: ce n'est point une sensation simple, mais une sensation composée de plusieurs sensations de même genre; & comme c'est par les seuls organes du toucher que nous nous mettons en mouvement, & que nous sentons que nous sommes en mouvement, il s'ensuit que c'est au toucher seul que nous devons la sensation de l'étendue. On objectera peut-être que nous recevons cette sensation par la vûe, aussi bien que par le toucher; que l'oeil embrasse un plus grand espace que la main n'en peut toucher, & qu'il mesure la distance de plusieurs objets que la main ne sauroit atteindre même avec ses instrumens. Tout cela est vrai, mais n'est vrai que de l'oeil instruit par le toucher; car l'expérience a démontré qu'un aveugle de naissance, à qui la vûe est rendue tout-à-coup, ne voit rien hors de lui, qu'il n'aperçoit aucune analogie entre les images qui se tracent dans le fond de ses yeux & les objets extérieurs qu'il connoissoit déjà par le toucher; qu'il ne peut apprécier leurs distances ni reconnoître leur situation, jusqu'à ce qu'il ait appris à voir, c'est-à-dire à remarquer les rapports constans qui se trouvent entre les sensations de la vûe & celles du toucher: par conséquent un homme qui n'auroit jamais exercé l'organe du toucher, ne pourroit apprendre à voir ni à juger des dimensions des objets extérieurs, de leurs formes, de leurs distances, en un mot de l'étendue; & quoiqu'on supposât en mouvement les images qui seroient tracées dans le fond de ses yeux, cependant comme il ne connoitroit point le mouvement par sa propre expérience, ces mouvemens apparens ne lui

donneroient qu'une simple idée de succession, comme feroit une suite des sons qui frapperoient successivement son oreille, ou d'odeurs qui affecteroient successivement son odorat; mais jamais ils ne pourroient suppléer à l'expérience du toucher, jamais ils ne pourroient, au défaut de cette expérience, faire naître la perception du mouvement réel, ni par conséquent celle de l'étendue sensible. Et comment des sens aussi différens que ceux de la vûe & du toucher, pourroient - ils exciter en nous cette dernière perception? L'oeil ne voit point les choses, il ne voit que la lumiere qui lui représente les apparences des choses par diverses combinaisons de rayons diversement colorés. Toutes ces apparences sont en nous, ou plutôt sont nous - mêmes, parce que l'organe de la vûe est purement passif; & que ne réagissant point sur les objets, il n'éprouve aucune sorte de résistance que nous puissions rapporter à des causes extérieures: au lieu que l'organe du toucher est un organe actif qui s'applique immédiatement à la matiere, sent les dimensions & la forme des corps, détermine leurs distances & leurs situations, réagit sur eux directement & sans le secours d'aucun milieu interposé, & nous fait éprouver une résistance étrangere, que nous sommes forcés d'attribuer à quelque chose qui n'est point nous; enfin c'est le seul sens par lequel nous puissions distinguer notre être de tous les autres êtres, nous assurer de la réalité des objets extérieurs, les éloigner ou les rapprocher suivant les lois de la nature, nous transporter nous - mêmes d'un lieu dans un autre, & par conséquent acquérir la vraie notion du mouvement & de l'étendue.

Le mouvement entre si essentiellement dans la notion de l'étendue, que par lui seul nous pourrions acquérir cette notion, quand même il n'existeroit aucun corps sensiblement étendu. Le dernier atome qui puisse être senti par l'organe du toucher, n'est point étendu sensiblement, puisque les parties étant nécessairement plus petites que le tout, celles de cet atome échapperoient nécessairement au sens du toucher par la supposition: cependant si l'organe du toucher étant mis en mouvement se trouve affecté successivement en plusieurs points par cet atome, nous pourrions nous former par cela seul la notion de l'étendue, parce que le mouvement de l'organe & la continuité des impressions successives dont il est affecté, semblent multiplier cet atome & lui donner de l'extension. Il est donc certain que les impressions continues & successives que font les corps sur les organes du toucher mis en mouvement, constituent la vraie notion de l'étendue; & même ces idées de mouvement & d'étendue sont tellement liées entre elles & si dépendantes l'une de l'autre, qu'on ne peut concevoir nettement aucune étendue déterminée que par la vitesse d'un mobile qui la parcourt dans un tems donné; & réciproquement que l'on ne peut avoir une idée précise

de la vitesse d'un mobile, que par l'étendue qu'il parcourt dans un tems donné: l'idée du tems entre donc aussi dans celle de l'étendue; & c'est par cette raison que dans les calculs physico - mathématiques, deux de ces trois choses, tems, vitesse, étendue, peuvent toujours être combinées de telle façon qu'elles deviennent l'expression & la représentation de la troisième (car je ne distingue pas ici l'étendue de l'espace absolu des Géometres, qui n'est autre chose que l'idée de l'étendue généralisée autant qu'elle peut l'être): ces trois idées doivent être inseparables dans nos raisonnemens, comme elles le sont dans leur génération; & elles deviennent d'autant plus lumineuses, qu'on sait mieux les rapprocher. Celles de l'espace & du tems qui semblent, à certains égards, d'une nature entièrement opposée, ont plus de rapports entr'elles qu'on ne le croiroit au premier coup - d'oeil. Nous concevons l'étendue abstraite ou l'espace, comme un tout immense, inaltérable, inactif, qui ne peut ni augmenter, ni diminuer, ni changer, & dont toutes les parties sont supposées co - exister à la fois dans une éternelle immobilité: au contraire toutes les parties du tems semblent s'anéantir & se reproduire sans cesse; nous nous le représentons comme une chaîne infinie, dont il ne peut exister à - la - fois qu'un seul point indivisible, lequel se lie avec celui qui n'est déjà plus, & celui qui n'est pas encore. Cependant, quoique les parties de l'étendue abstraite ou de l'espace soient supposées permanentes, on peut y concevoir de la succession, lorsqu'elles sont parcourues par un corps en mouvement; & quoique les parties du tems semblent fuir sans cesse & s'écouler sans interruption, l'espace parcouru par un corps en mouvement fixe, pour ainsi dire, la trace du tems, & donne une sorte de consistance à cette abstraction légère & fugitive. Le mouvement est donc le noeud qui lie les idées si différentes en apparence du tems & de l'espace, comme il est le seul moyen par lequel nous puissions acquérir ces deux idées, & le seul phénomène qui puisse donner quelque réalité à celle du tems.

On pourroit encore assigner un grand nombre d'autres rapports entre le tems & l'espace; mais il suffira de parcourir ceux qui peuvent jeter quelque lumière sur la nature de l'étendue. L'espace & le tems sont le lien de toutes choses; l'un embrasse toutes les co - existences possibles; l'autre toutes les successions possibles. Le tems est supposé couler avec une vitesse constante & uniforme, par cela même qu'on en fait l'unité de mesure de toute succession; car il est de l'essence de toute unité de mesure d'être uniforme: de même l'espace est supposé uniforme dans tous ses points, parce qu'il est avec le tems la mesure du mouvement; d'ailleurs cette uniformité du tems & de l'espace ne pourroit être altérée que par des existences réelles, que l'abstraction exclut formellement de ces deux idées. Par la même raison ces deux idées sont indéterminées,

tant qu'elles sont considérées hors des êtres physiques, desquels seuls elles peuvent recevoir quelque détermination. L'une & l'autre considérées dans les choses, sont composées de parties qui ne sont point similaires avec leur tout, c'est - à - dire que toutes les parties de l'étendue & de la durée sensibles, ne sont point étendue & durée; car puisque l'idée de succession entre nécessairement dans l'idée de durée, cette partie de la durée qui répond à une perception simple, & dans laquelle nous ne concevons aucune succession, n'est point durée; & l'atome de matière dans lequel nos sens ne peuvent distinguer de parties, n'est point sensiblement étendu. J'ai grand soin de distinguer l'étendue abstraite de l'étendue sensible, parce que ce sont en effet des acceptions très - différentes du même mot. La véritable étendue sensible, c'est l'étendue palpable: elle consiste dans les sensations qu'excitent en nous les surfaces des corps parcourues par le toucher. L'étendue visible, si l'on veut absolument en admettre une, n'est point une sensation directe, mais une induction fondée sur la correspondance de nos sensations, & par laquelle nous jugeons de l'étendue palpable d'après certaines apparences présentes à nos yeux. Enfin l'étendue abstraite est l'idée des dimensions de la matière, séparées par une abstraction métaphysique de toutes les qualités sensibles des corps, & par conséquent de toute idée de limites, puisque l'étendue ne peut être limitée en effet que par des qualités sensibles. Il seroit à souhaiter que chacune de ces diverses acceptions eût un terme propre pour l'exprimer: mais soit que l'on consente ou que l'on refuse de remédier à la confusion des signes, il est très - important d'éviter la confusion des idées; & pour l'éviter il faut, toutes les fois que l'on parle de l'étendue, commencer par déterminer le sens précis qu'on attache à ce mot. Par cette seule précaution une infinité de disputes qui partagent tous les jours le monde philosophe, se trouveroient décidées ou écartées. On demande si l'étendue est divisible à l'infini: mais veut - on parler du phénomène sensible, ou bien de l'idée abstraite de l'étendue? Il est évident que l'étendue physique, celle que nous connoissons par les sens, & qui semble appartenir de plus près à la matière, n'est point divisible à l'infini; puisqu'après un certain nombre de divisions, le phénomène de l'étendue s'évanouit, & tombe dans le néant relativement à nos organes. Est - ce seulement de l'idée abstraite de l'étendue qu'on entend parler? Alors comme il entre de l'arbitraire dans la formation de nos idées abstraites, je dis que de la définition de celle - ci doit être déduite la solution de la question sur l'infinie divisibilité. Si l'on veut que toute partie intelligible de l'étendue soit de l'étendue, la divisibilité à l'infini aura lieu; car comme les parties divisées intellectuellement peuvent être représentées par une suite infinie de nombres, elles n'auront pas plus de limites que ces nombres, & seront infinies dans le même sens,

c'est - à - dire que l'on ne pourra jamais assigner le dernier terme de la division. Une autre définition de l'étendue abstraite auroit conduit à une autre solution. La question sur l'infinité actuelle de l'étendue se resoudroit de la même manière: elle dépend, à l'égard de l'étendue sensible, d'une mesure actuelle qu'il est impossible de prendre; & l'étendue abstraite n'est regardée comme infinie, que parce qu'étant séparée de tous les autres attributs de la matière, elle n'a rien en elle-même, comme nous l'avons déjà remarqué, qui puisse la limiter ni la déterminer. On demande encore si l'étendue constitue ou non l'essence de la matière? Je réponds d'abord que le mot essence est équivoque, & qu'il faut en déterminer la signification avant de l'employer. Si la question proposée se réduit à celle-ci, l'étendue est-elle un attribut de la matière, tel que l'on puisse en déduire par le raisonnement tous ses autres attributs? Il est clair dans ce sens que l'étendue, de quelque façon qu'on la prenne, ne constitue point l'essence de la matière; puisqu'il n'est pas possible d'en déduire l'impénétrabilité, ni aucune des forces qui appartiennent à tous les corps connus. Si la question proposée revient à celle-ci: est-il possible de concevoir la matière sans étendue? Je réponds que l'idée que nous nous faisons de la matière est incomplète toutes les fois que nous omettons par ignorance ou par oubli quelqu'un de ses attributs; mais que l'étendue n'est pas plus essentielle à la matière, que ses autres qualités: elles dépendent toutes, ainsi que l'étendue, de certaines conditions pour agir sur nous. Lorsque ces conditions ont lieu, elles agissent sur nous aussi nécessairement que l'étendue, & toutes, sans excepter l'étendue, ne diffèrent entr'elles que par les différentes impressions dont elles affectent nos organes. Je ne conçois donc pas dans quel sens de très-grands métaphysiciens ont cru & voulu faire croire que l'étendue étoit une qualité première qui résidoit dans les corps telle précisément, & sous la même forme qu'elle réside dans nos perceptions; & qu'elle étoit distinguée en cela des qualités secondaires, qui, selon eux, ne ressemblent en aucune manière aux perceptions qu'elles excitent. Si ces métaphysiciens n'entendoient parler que de l'étendue sensible, pourquoi refusoient-ils le titre de qualités premières à toutes les autres qualités sensibles? & s'ils ne parloient que de l'étendue abstraite, comment vouloient-ils transporter nos idées dans la matière, eux qui avoient une si grande répugnance à y reconnoître quelque chose de semblable à nos sensations? La cause d'une telle contradiction ne peut venir que de ce que le phénomène de l'étendue ayant un rapport immédiat au toucher, celui de tous nos sens qui semble nous faire le mieux connoître la réalité des choses, & un rapport indirect à la vue, celui de tous nos sens qui est le plus occupé, le plus sensible, qui conserve le plus long tems les impressions des objets, & qui fournit le

plus à l'imagination, nous ne pouvons guere nous représenter la matiere sans cette qualité toûjours présente à nos sens extérieurs & à notre sens interieur; & de - là on l'a regardée comme une qualité premiere & principale, comme un attribut essentiel, ou plutôt comme l'essence même des corps, & l'on a fait dépendre l'unité de la nature de l'extension & de la continuité des parties de la matiere, au lieu d'en reconnoître le principe dans l'action que toutes ces parties exercent perpétuellement les unes sur les autres, qu'elles exercent même jusque sur nos organes, & qui constitue la véritable essence de la matiere relativement à nous.

Au reste comme il faut être de bonne foi en toutes choses, j'avoue que les questions du genre de celles que je viens de traiter, ne sont pas à beaucoup près aussi utiles qu'elles sont épineuses; que les erreurs en pareille matiere intéressent médiocrement la société; & que l'avancement des sciences actives qui observent & découvrent les propriétés des êtres, qui combinent & multiplient leurs usages, nous importe beaucoup plus que l'avancement des sciences contemplatives, qui se bornent aux pures idées. Il est bon, il est même nécessaire de comparer les êtres, & de généraliser leurs rapports; mais il n'est pas moins nécessaire, pour employer avantageusement ces rapports généralisés, de ne jamais perdre de vûe les objets réels auxquels ils se rapportent, & de bien marquer le terme où l'abstraction doit enfin s'arrêter. Je crois qu'on est fort près de ce terme toutes les fois qu'on est parvenu à des vérités identiques, vagues, éloignées des choses, qui conserveroient leur inutile certitude dans tout autre univers gouverné par des lois toutes distérentes, & qui ne nous sont d'aucun secours pour augmenter notre puissance & notre bien - être dans ce monde où nous vivons. Cet article est de M. Gufnaut, éditeur de la collection académique; ouvrage sur l'importance & l'utilité duquel il ne reste rien à ajoûter, après le discours plein de vûes saines & d'idées profondes que l'éditeur a mis à la tête des trois premiers volumes qui viennent de paroître.

Sur l'étendue géométrique, & sur la maniere dont les Géometres la considerent, voyez l'art. Géométrie, auquel cette diseussion appartient immédiatement.

ETHER (Cf. VIDE* – Histoires de)

La substance du vide. Élément matériel emplissant tout l'espace laissé vide par la matière ordinaire.

Dans l'Antiquité, il apparaît comme un cinquième élément ajouté aux quatre éléments fondamentaux: le feu, l'eau, l'air et la

terre. Aristote considère l'éther comme la substance du monde supra lunaire. Les Alchimistes considèrent la Quintessence* comme un éther terrestre, médiateur universel entre les éléments.

Dans la Science Moderne, à partir de Newton, l'éther est un milieu matériel qui permet la propagation des forces d'interaction ou de la lumière dans le vide. Ce serait le milieu où se propageraient les ondes électromagnétiques. La lumière comme vibrations de l'éther. Mais les ondes lumineuses transportent un phénomène électromagnétique qui s'exprime dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. On a dépensé beaucoup d'efforts pour imaginer un milieu qui aurait cette propriété étonnante. De toute façon l'éther devrait avoir des propriétés mécaniques paradoxales et contradictoires pour satisfaire aux faits expérimentaux: être infiniment dilué pour rendre compte de l'absence de frottement lors du passage de l'onde électromagnétique, mais en même temps être élastique ou solide pour expliquer la très grande vitesse de propagation. Mais la Relativité Restreinte* exclu l'existence d'un éther, milieu ordonné, car il pourrait servir de repère privilégié. Dirac montre alors qu'un éther turbulent est cependant parfaitement envisageable.

C'est la problématique de l'espace, du vide et de l'éther qui va être la cause de la « chute » du mécanisme*. Comme l'a dit M. Planck* l'éther est le point le plus douloureux de la théorie mécaniste. C'est à cause de l'échec de toutes les tentatives pour donner un modèle mécaniste de l'éther que l'électromagnétisme va se réfugier dans une attitude scientifique issue de la tradition kantienne, un phénoménalisme mathématisé. Les deux plus grandes théories physiques du XX^e siècle la Relativité* et la Mécanique quantique* s'inscriront dans cette perspective.

On n'a pas cessé de rêver à l'éther. Tout en se défendant d'être un nouvel éther, le Vide Quantique ne cesse de participer à ces fantasmes scientifiques.

ETHER (Encyclopédie. Article de d'Alembert)

ETHER, s. m. (Physiq.) on entend ordinairement par ce terme une matiere subtile qui, selon plusieurs philosophes, commençant aux confins de notre atmosphere, occupe toute l'étendue des cieux. Voyez Ciel, Monde, &c.

Ce mot vient du grec; c'est pour cette raison que l'on peut écrire indifféremment oether ou éther, parce que si la derniere maniere d'écrire

ce mot en françois est plus conforme à l'usage, la premiere l'est davantage à l'etymologie.

Plusieurs philosophes ne sauroient concevoir que la plus grande partie de l'Univers soit entierement vuide; c'est pourquoi ils le remplissent d'une sorte de matiere appelée éther. Quelques - uns conçoivent cet éther comme un corps d'un genre particulier, destiné uniquement à remplir les vuides qui se trouvent entre les corps célestes; & par cette raison ils le bornent aux régions qui sont au - dessus de notre atmosphere. D'autres le font d'une nature si subtile, qu'il pénètre l'air & les autres corps, & occupe leurs pores & leurs intervalles. D'autres nient l'existence de cette matiere différente de l'air, & croient que l'air lui - même, par son extrême ténuité & par cette expansion immense dont il est capable, peut se répandre jusque dans les intervalles des étoiles, & être la seule matiere qui s'y trouve. Voyez Air.

L'éther ne tombant pas sous les sens & étant employé uniquement ou en faveur d'une hypothèse, ou pour expliquer quelques phénomènes reels ou imaginaires, les Physiciens se donnent la liberté de l'imaginer à leur fantaisie. Quelques - uns croient qu'il est de la même nature que les autres corps, & qu'il en est seulement distingué par sa ténuité & par les autres propriétés qui en résultent; & c'est - là l'éther prétendu philosophique. D'autres prétendent qu'il est d'une espece différente des corps ordinaires, & qu'il est comme un cinquieme élément, d'une nature plus pure, plus subtile, & plus spiritueuse que les substances qui sont autour de la terre, & dont aussi il n'a pas les propriétés, comme la gravité, &c. Telle est l'idée ancienne & conimune que, l'on avoit de l'éther, ou de la matiere éthérée.

Le terme d'éther se trouvant donc embarrassé par une si grande variété d'idées, & étant appliqué arbitrairement à tant de différentes choses, plusieurs philosophes modernes ont pris le parti de l'abandonner, & de lui en substituer d'autres qui exprimassent quelque chose de plus précis.

Les Cartésiens employent le terme de matiere flibtile pour désigner leur éther. Newton employe quelquefois celui d'esprit subtil, comme à la fin de ses Principes; & d'autres fois celui de milieu subtil ou éthéré, comme dans son Optique. Au reste, quantité de raisons semblent démontrer qu'il y a dans l'air une matiere beaucoup plus subtile que l'air même. Après qu'on a pompé l'air d'un récipient, il y reste une matiere différente de l'air; comme il paroît par certains effets que nous voyons être produits dans le vuide. La chaleur, suivant l'observation de Newton, se communique à - travers le vuide presque'aussi facilement qu'à - travers l'air. Or une telle communication ne peut se faire sans le secours d'un

corps intermédiaire. Ce corps doit être assez subtil pour traverser les pores du verre; d'où l'on peut conclure qu'il traverse aussi ceux de tous les autres corps, & par conséquent qu'il est répandu dans toutes les parties de l'espace. Voyez Chaleur, Feu, &c.

Newton, après avoir ainsi établi l'existence de ce milieu étheré, passe à ses propriétés, & dit qu'il est non - seulement plus rare & plus fluide que l'air, mais encore beaucoup plus élastique & plus aétif; & qu'en vertu de ces propriétés, il peut produire une grande partie des phénomènes de la nature. C'est, par exemple, à la pression de ce milieu que Newton semble attribuer la gravité de tous les autres corps; & à son élasticité, la force élastique de l'air & des fibres nerveuses, l'émission, la réfraction, la réflexion, & les autres phénomènes de la lumière; comme aussi le mouvement musculaire, &c. On sent assez que tout cela est purement conjectural, sur quoi voyez les articles Pesanteur, Gravité, &c.

L'éther des Cartesiens non - seulement pénètre, mais encore remplit exactement, selon eux, tous les vides des corps, ensorte qu'il n'y a aucun espace dans l'Univers qui ne soit absolument plein. Voyez Matière subtile, Plein, Cartésianisme, &c.

Newton combat ce sentiment par plusieurs raisons, en montrant qu'il n'y a dans les espaces célestes aucune résistance sensible; d'où il s'ensuit que la matière qui y est contenue, doit être d'une rareté prodigieuse, la résistance des corps étant proportionnelle à leur densité: si les cieux étoient remplis exactement d'une matière fluide, quelque subtile qu'elle fût, elle résisteroit au mouvement des planètes & des comètes, beaucoup plus que ne feroit le mercure. Voyez Résistance, Vide, Planète, Comète, &c. Harris & Chambers.

ETOILES

ETRANGETE

ETRE

EVENEMENT

EVENEMENT ALEATOIRE

EVOLUTIF (PROCESSUS)

EVOLUTION BIOLOGIQUE

Le fait que les organismes vivants évoluent est une des grandes idées nouvelles apportées d'abord par Lamarck* puis par Darwin* en 1859. Elle bouleverse la conception que l'on se faisait du vivant et de l'homme. Elle pose avec acuité le problème de l'origine de la vie*. Pendant bien plus d'un siècle, c'est la théorie de l'évolution darwinienne* et le néodarwinisme* fondés sur la sélection naturelle des mutations aléatoires des gènes qui va dominer la scène scientifique, même sous la houlette de la biologie moléculaire*. Mais l'évolution cohérente d'une espèce reste inexplicée, car on ne sait pas définir l'espèce biologiquement. Celle-ci reste définie zoologiquement d'une manière phénoménologique.

La pensée biologique sur l'hérédité* et l'évolution est en cours de bouleversement. Une nouvelle synthèse apparaît qui met au défi la version du néo-darwinisme* centrée sur le gène* qui a dominé la pensée biologique dans le dernier demi-siècle.

Quatre faits se dégagent :

L'hérédité ne passe pas uniquement par les gènes .

Certaines variations héréditaires n'ont pas une origine aléatoire*

Certaines informations acquises se trouvent héritées.

L'évolution peut résulter aussi bien d'un programme que d'une sélection.

Ces affirmations peuvent sembler hérétiques à quiconque a appris la vieille théorie néo-darwinienne, où l'évolution est une adaptation de variations génétiques aléatoires à travers la sélection naturelle. La biologie moléculaire* est pour beaucoup dans ces changements conceptuels.

Il a été démontré que les cellules peuvent transmettre de l'information à des cellules filles par une hérédité non régie par l'ADN* (épigénétique*). Ceci signifie que tous les organismes ont au moins deux systèmes d'hérédité*. De plus, de nombreux animaux transmettent de l'information par leur comportement, ce qui leur donne un troisième système héréditaire. Et nous les humains en avons un quatrième, car l'héritage basé sur la symbolique*, en particulier linguistique*, joue un rôle substantiel dans notre évolution. Il est donc tout à fait faux de penser l'hérédité et l'évolution en termes du seul système génétique. L'héritage épigénétique*, comportemental et symbolique produit aussi des variations sur lesquelles la sélection naturelle peut agir.

Le déchiffrement des génomes, c.a.d. l'énumération des gènes présents sur les paires des vingt trois chromosomes*, a été un moment de grande excitation scientifique et médiatique. Le génome humain a

été déchiffré en 2001 et a révélé un trentaine de milliers de gènes. Mais cette avancée scientifique a ouvert de nouveaux horizons. On ne peut plus considérer le gène comme un filament d'ADN stable par lui-même, codant la production d'une protéine et copié fidèlement lors de la transmission. Nous savons maintenant que toute une batterie de mécanismes sophistiqués entre en jeu pour maintenir la structure de l'ADN et la fidélité de sa réplication. La stabilité réside dans le système total et non dans le gène. De plus le gène ne peut être considéré comme une entité autonome- un filament particulier d'ADN qui produit toujours le même effet. Qu'une certaine longueur d'ADN produise quelque chose, ce qu'elle produit, où et quand elle le produit peut dépendre d'autres séquences d'ADN et de l'environnement. Le filament d'ADN qui constitue un « gène » n'a de sens que dans le système global. Du fait que l'action d'un gène dépend du contexte, la modification d'un seul gène n'a pas d'effet important sur le caractère qu'il influence. Considérer l'évolution comme la modification d'un seul gène isolé perd son sens, ce sont des réseaux de gènes qu'il faut examiner. Tout un atomisme* biologique simpliste s'écroule. Le génome est un système dynamique et complexe.

Les nouvelles connaissances sur les gènes et le génome mettent au défi les hypothèses de la théorie de l'évolution courante sous un autre angle. Si le génome est un système organisé plutôt qu'une simple assemblée de gènes, les processus qui engendrent des variations génétiques sont une propriété évoluée du système, contrôlée et modulée par le génome et la cellule. Ce qui signifierait que contrairement à l'opinion longtemps majoritaire, toutes les variations génétiques ne sont pas complètement aléatoires ou aveugles ; certaines peuvent être régulées et partiellement dirigées. En termes plus explicites cela peut signifier qu'il y'a des mécanismes lamarckiens qui autorisent « un héritage doux »- l'héritage de modifications génomiques provoquées par des facteurs environnementaux. Des faits de l'immunologie moléculaire favorisent l'idée que le soma* puisse agir sur les gamètes*.

Denis Noble dans *La musique de la vie, au-delà du génome* (éd. du seuil, 2006) évoque quelques travaux en ce sens. Rejetant l'idée que les gènes constituent un *programme* régissant l'organisme, il voit plutôt le génome comme une *base de données* dans laquelle le métabolisme cellulaire puise pour la synthèse des protéines (idée émise également par Henri Atlan*). A la *causalité ascendante*, qui va du gène à l'organisme, la seule qui soit admise aujourd'hui en biologie, il considère qu'il existe également une *causalité descendante**, qui va de l'organisme aux gènes, sorte de rétro-action comme il est courant d'en voir dans les systèmes complexes. Cette dernière, selon des modalités

qui restent à découvrir, pourrait produire des modifications du génome plus aisément et de manière plus adaptative que le hasard des mutations seul admis jusqu'ici. Jusqu'à récemment, croire que des caractères acquis puissent être hérités était une profonde hérésie. Témoins les remous autour de l'affaire politico-scientifique associée en URSS au nom de Lyssenko.

Des changements dans les séquences d'ADN sont inévitables. Ils résultent des imperfections du processus de copie, des changements lorsque des gènes passent d'une place à l'autre, de changements chimiques spontanés, de dommages causés par des substances chimiques participant à l'activité cellulaire. Des lésions de l'ADN sont produites par les rayons X et les rayons ultraviolet ou par des agents chimiques, augmentant le risque du cancer, souvent associé à des changements génétiques dans les cellules somatiques. L'évolution darwinienne* à long terme à travers le système génétique dépend de ces changements.

On peut se demander comment une molécule instable comme l'ADN se trouve porteuse d'information ? La réponse est que les organismes ont toute une batterie de mécanismes qui le protègent et le réparent, assurant la stabilité des séquences de nucléotides* et leur copie fidèle. De ce fait les mutations sont rares.

Le problème est de savoir si ces mutations se produisent au hasard ou si elles obéissent à certains besoins. Il y a aujourd'hui des évidences expérimentales et théoriques pour penser que les mutations et les variations génétiques sont des processus contrôlés. Ainsi l'évolution ne se produirait pas au hasard mais pourrait être un processus dirigé. On s'est en fait beaucoup demandé comment l'évolution qui paraît avoir des lois pourrait provenir de mutations aléatoires ?

Ainsi apparaît-il une crise de ce darwinisme qui réduit l'évolution à l'addition de mutations aléatoires et de sélection naturelle. Ceci cadre mal avec la directionnalité et la progressivité de l'évolution.

On pense aujourd'hui que la vie n'est pas née par hasard mais résulte de l'activité géochimique de la terre. Par ailleurs le développement de la vie suit les lois d'évolution des systèmes ouverts* qui selon la thermodynamique de non équilibre* de Prigogine tendent à minimiser la production d'entropie*. Cette production d'entropie pour les systèmes vivants s'entend comme le prix payé par la vie au moyen de la mort*, le rapport de la mortalité à l'activité vivante. Certains évolutionnistes reviennent à des idées déjà énoncées par le russe L.S. Berg et le jésuite P. Teilhard de Chardin* sur la

nomogénèse. Les organismes vivants posséderaient une prédisposition à varier dans certaines directions, et cette prédisposition déterminerait d'abord les tendances de l'évolution; de même que les cristaux croissent suivant une certaine forme, les tendances phylogénétiques se développeraieent selon certaines lois, sans tenir compte de l'adaptation* ni de la sélection naturelle. Cette idée fut le plus souvent appelée « évolution dirigée » ou « orthogénèse ». Il faut considérer l'évolution comme un processus systémique, où les facteurs déterminants sont les propriétés globales du système biologique* (biosphère, biocénose*, espèces*, populations et organismes*).

EVOLUTION DARWINIENNE

Dans son ouvrage de 1859 « The origin of species », Darwin* attire l'attention sur un certain nombre de lois du vivant : la reproduction, l'hérédité*, les variations entre individus et la lutte pour l'existence. Dans ces conditions l'évolution par sélection naturelle est inévitable : l'organisme qui a le plus grand pouvoir de survie et de multiplication se développera aux dépens des autres. Cette théorie est très générale. Elle ne dit rien sur les processus d'hérédité et de multiplication, rien sur l'origine des variations héréditaires, rien sur ce qui résulte de la sélection naturelle. Darwin ne savait pas ce qu'était un gène. C'est pourquoi la théorie darwinienne est si générale qu'on l'applique dans les domaines les plus divers comme l'économie ou la culture. La notion d'optimalité est trop vague pour que la notion de sélection naturelle prenne un sens.

Mais la théorie darwinienne n'envisage la sélection naturelle qu'à l'échelle de l'individu et ne rend pas compte de l'évolution d'une espèce. Le néo-darwinisme tout autant, puisqu'il envisage une sélection naturelle fondée sur les mutations aléatoires des gènes. Comment le hasard imposerait il un comportement cohérent de l'espèce ?

Cinquante ans avant Darwin, Lamarck* avait lui aussi proposé une théorie de l'évolution qui a pu sembler fausse jusqu'à nos jours. Pour lui l'évolution provenait de l'influence des conditions de vie. Les girafes avaient un long cou car leurs ancêtres cherchaient constamment à manger des feuilles sur des arbres élevés, d'où l'allongement de leurs cous. Il supposait l'hérédité des caractères acquis, soit des modifications de l'être vivant durant son existence. La théorie de la sélection naturelle de Darwin éclipsa la théorie de Lamarck. Mais raconter l'histoire ainsi est une falsification car Darwin croyait aussi à l'hérédité des caractères acquis.

C'est Weisman, qui dans un contexte scientifique différent où les connaissances sur la cellule étaient plus avancées, montrant l'existence des chromosomes* comme porteur de l'hérédité, qui créa un néodarwinisme* où l'hérédité des caractères acquis était réfutée. Depuis le temps où l'on pratique la circoncision on n'a jamais vu naître un enfant circonci.

EXACTITUDE ET VERITE

L'exactitude est un concept de la logique exprimant la conformité d'un raisonnement aux règles de la logique formelle*. La vérité* est dans la réalité objective de son résultat.

EXCITATION

EXISTENCE

Le fait d'être* de manière actuelle*. L'existence se distingue de l'essence* qui est la nature conceptuelle d'une chose, son pouvoir d'être, en en réalisant la pleine actualité. L'existence s'oppose au néant*. C'est une réalité objective indépendante de la conscience du sujet. Le rapport entre l'existence et la conscience constitue la question fondamentale de la philosophie*.

Alors que les présocratiques identifiaient l'existence avec le monde matériel, Platon* opposait l'existence sensible à l'existence véritable du monde des idées. En s'appuyant sur son principe de relation entre la forme et la matière, Aristote * souscrivait à une telle opposition. La scolastique médiévale distinguait l'existence en acte de l'existence en puissance. Pour Thomas d'Aquin* « l'existence (esse) est à l'essence, ce que l'actualité est à la potentialité ». A la Renaissance et lors de la révolution scientifique, l'existence s'identifie à nouveau avec le monde matériel. Pour Kant l'existence n'est pas une propriété des choses, c'est un moyen général de liaison entre nos concepts et nos jugements, une manifestation du phénomène*. Dans la phénoménologie de Husserl* la doctrine de l'existence étudie la structure des actes intentionnels de la conscience. Chez Heidegger* l'existence est définie par rapport à l'existence humaine. Sartre* opposait l'existence en soi à l'existence pour soi. L'existentialisme* désigne des courants de pensée privilégiant la notion d'existence.

L'émergence de la logique mathématique* a amené à s'interroger sur la signification du symbole « il existe », le quantificateur* d'existence. Frege* conclut que l'existence n'est pas une propriété des individus mais une « propriété de propriétés ». Dire

qu'un individu ou une catégorie de chose existent signifie que le concept correspondant est présent.

EXISTENTIALISME

Tout comme rationalisme* ou empirisme* le terme d'existentialisme appartient à l'histoire intellectuelle. Son emploi répond à des besoins de classification et d'appréciation des positions intellectuelles. Le terme a été explicitement adopté pour se désigner par Jean Paul Sartre*, et s'est identifié à un mouvement culturel européen des années 40 et 50, à travers la production littéraire et philosophique de Sartre et de ses compagnons, Simone de Beauvoir, Maurice Merleau Ponty et Albert Camus. On a identifié comme existentialistes des philosophes comme Karl Jaspers et Martin Heidegger*, ou Nicolas Berdiaev et Lev Chestov. Søren Kierkegaard et Friedrich Nietzsche* sont considérés comme des précurseurs.

L'existentialisme de Sartre tire son inspiration de « Etre et temps » de Heidegger* (1927) où s'introduisent un certain nombre de thématiques liés à l'existence* : la tension entre l'individu et le public, le caractère situé dans le monde de la pensée et de la raison humaine, une fascination pour l'expérience de l'anxiété, de la mort*, du nihilisme*, un rejet de la science comme cadre de compréhension de l'être humain, et une identification de l'authenticité par la liberté*, le choix et l'engagement. Le slogan de Sartre, « l'existence précède l'essence » caractérise ce qu'il y a d'essentiel dans l'existentialisme, à savoir qu'il n'y a pas de sens général à l'humain autre que celui défini par l'existence.

EXPANSION DE L'UNIVERS

Selon la théorie cosmologique d'Einstein, dans la solution donnée par Friedman en 1923, l'univers est en expansion. Cette prévision a été vérifiée de manière astronomique par l'observation de l'écartement des amas stellaires, ou récession des galaxies* (Hubble. 1923) et considérée comme le résultat de l'explosion d'une matière superdense associée au Big Bang. Cette image a reçu une confirmation lors de la découverte du rayonnement résiduel*.

EXPERIENCE CRUCIALE

Une expérience cruciale est une expérience physique* qui confirme ou réfute (réfutabilité*) une théorie*. Les expériences dites cruciales, sont celles qui permettent de décider assurément entre deux théories portant sur les mêmes phénomènes. Mais la sous

détermination d'une théorie* par rapport à l'expérience (plusieurs théories peuvent correspondre à une même expérience) rend l'existence d'une expérience cruciale problématique. Bien des expériences dites cruciales ne le sont pas (ex. L'effet Compton*). L'histoire des sciences fait souvent le récit de ces expériences qui auraient donc le pouvoir d'emporter la décision quant à la valeur d'une théorie. Pourtant, les choses ne sont pas si simples.

Une expérience cruciale pour la relativité galiléenne* est la chute d'un boulet du haut d'un mat d'un bateau en mouvement. Tombera-t-il au pied du mat ou non ? Galilée* n'avait cure de faire cette expérience et c'est Gassendi* qui la fit quelques années plus tard.

On admet d'une manière générale que la relativité restreinte* d'Einstein est le résultat de la mise en œuvre du résultat négatif sur la vitesse de la lumière dans l'expérience de Michelson-Morley.

Kaufmann, professeur de physique expérimentale de l'université de Göttingen, avait mené des expériences sur la valeur de la masse en fonction de la vitesse et avait trouvé que l'équation d'Einstein était fautive. Einstein a simplement dit : "Il se trompe.". Quelques années plus tard, Kaufmann, qui était un savant honnête, a découvert en révisant la conception de son expérience que le vide parfait n'était pas réalisé et qu'il y avait une fuite. Il a refait son expérience et a reconnu qu'Einstein avait raison. En somme, les réfutations ne sont pas plus durables que les confirmations. Toutes sont, à quelque degré, entachées d'un certain doute.

L'expérience de Lenard (1902). fut interprétée par Einstein comme une expérience cruciale tranchant entre théorie ondulatoire de la lumière et théorie corpusculaire de la lumière, en faveur de la seconde, et donc en faveur de sa théorie des photons* en tant que constituants de la lumière. Cette expérience montre que la lumière adopte un comportement de type corpusculaire. Néanmoins, quelques années plus tard, la théorie de la lumière se brouillera à nouveau puisque si la nature photonique de la lumière est admise, la théorie quantique apportera une interprétation duale – ondes et corpuscules – de la lumière. L'expérience de Lenard n'avait pas été cruciale, ou du moins avait été temporairement cruciale.

Newton* comme Fresnel * pensaient chacun de son côté disposer d'expériences cruciales montrant le caractère corpusculaire ou ondulatoire de la lumière.

Citons quelques expériences considérées comme cruciales.

Le rayonnement du corps noir* fonde la théorie des quanta* de Planck*.

A la suite de la découverte de la radioactivité* par Becquerel, les expériences de Rutherford et Soddy, confirment la transmutabilité des éléments chimiques.

Les expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien*, confirmant la théorie d'Einstein, conforte l'existence des atomes et des molécules. Ils existent puisque l'on peut les compter (Poincaré).

L'étude de la diffusion des particules alpha par Geiger et Marsden montre l'existence du noyau* atomique.

L'expérience de collision des électrons avec les atomes de Franck et Hertz montre la validité du modèle de Bohr des atomes avec ses niveaux d'énergie.

L'expérience de Stern et Gerlach sur l'orientation des moments magnétiques atomiques prouve l'existence du spin*.

Les propriétés corpusculaires de la lumière sont conformes à l'effet photoélectrique* et à l'effet Compton*, quoique ce dernier puisse être expliqué par une théorie ondulatoire.

Les expériences de Davisson et Germer sur la diffraction des électrons ou les expériences de Faget sur l'interférence des électrons dans les trous d'Young sont des preuves des propriétés ondulatoires de la matière. De nombreuses autres expériences confirment ces résultats sur des atomes ou des molécules.

Force est cependant de constater qu'une expérience ne fonde pas une théorie* même si elle peut la réfuter. Le statut d'une théorie dépend tout d'abord de la structure de son édifice et de ses rapports avec les théories voisines. C'est ce que nous apprend le positivisme logique*.

EXPERIENCE DE PENSEE (Gedanken Experiment)

EXPERIENCE ET THEORIE

EXPERIENCE PHYSIQUE

Une expérience physique est l'application d'une démarche cybernétique* à un dispositif physique. Elle ne cherche pas à caractériser le système constitué par le dispositif, mais à obtenir des réponses du dispositif à des actions extérieures. Elle a recours à la notion d'état* pour exprimer la connaissance suffisante du dispositif pour décrire l'expérience.

EXPLICATION

Utilisation des faits* et de leur interprétation* pour identifier les causes* d'un phénomène. Expliquer quelque chose c'est comprendre pourquoi il se produit.

EXPLICATION SCIENTIFIQUE

EXPOSANT DE LYAPOUNOV

EXPRESSION

Le mot expression est d'un usage fréquent pour désigner un type de rapport sémiotique entre un signifiant* et une référence qui s'y rattache, en l'opposant à la dénotation* simple ou à la représentation*. C'est l'existence d'une propriété qui n'est pas explicitement attribuée mais qui se trouve impliquée par la présence du signifiant.

Ainsi en physique une équation* ou une loi* peuvent être considérées comme l'expression des principes qui président à leur existence. Ainsi de nombreuses lois expriment des propriétés de symétrie* ou d'invariance*. Le second principe* de la thermodynamique exprime l'irréversibilité*. De nombreuses équations de la physique expriment un principe de moindre action*.

En un sens plus limité le mot est utilisé en mathématiques pour désigner un terme ou une formule.

EXTRAPOLATION

EXTREMAUX (Principes. Cf. Principes variationnels)

FAIRE SEMBLANT

FAIT

Partie de l'expérience répétitive à laquelle on attribue une certaine identité et que l'on incorpore au discours théorique. Il n'y a pas de faits naturels bruts en science, les faits y sont construits et participent d'une chaîne complexe où les théories surdéterminent* les faits et où les faits sous déterminent* les théories. Les faits sont toujours des faits abstraits*.

Cette ambiguïté et cette fragilité du fait apparaît déjà en psychologie expérimentale où la perception ne se manifeste pas comme une sensation pure mais comme une élaboration de celle ci par le cerveau.

FEEDBACK (Cf. Rétroaction*).

FERMIONS

FERROMAGNETISME

FEYNMANN (DIAGRAMMES DE) (Cf. Diagrammes de Feynmann*)

FICTIF (Force fictive- Cf. Force d'inertie*)

FICTION

La fiction est une construction de notre esprit* censée représenter des réalités possibles ou imaginables. La réalité* elle-même n'est perçue par notre esprit qu'à travers des fictions. La fiction est une réalité inventée.

La fiction permet de manifester une identité de la science par des superpositions dynamiques de concepts* et de logiques, de modèles*, d'hypothèses*, de disciplines, de signes*, de contenus, de symboles*, de tout ingrédient, mis en rapport indirectement avec le Réel

FICTIONNALISME

Conception selon laquelle le contenu référentiel des théories ou des modèles est un leurre. Ce sont des fictions*. Dans sa « Philosophie du 'comme si' » (1911) Hans Vaihinger a développé un fictionnalisme généralisé qui est un antiréalisme* radical au service d'un pragmatisme* délibéré.

La fin du XIX^e siècle voit naître, après la longue domination du réalisme* artistique et scientifique, une prise de conscience de l'écart entre notre perception ou notre représentation du monde et le monde tel qu'il est supposé être en notre absence. La connaissance* n'est pas une copie de la nature mais donne naissance à des formations abstraites ou symboliques, véritables fictions* à statut pragmatique*, dont l'efficacité cognitive reste à comprendre. L'imaginaire* est au cœur même de la connaissance.

Cette autonomie des représentations* constitue le fond sur lequel se développent des philosophies de la connaissance comme celles de Helmholtz*, Mach*, Duhem*, Hertz*, Poincaré*, Vaihinger*, Cassirer*.....qui sont autant d'anti-réalistes* considérant que les objets de la connaissance sont des produits de notre esprit, de notre perception ou de notre raison.

Ce débat réalisme*-antiréalisme* n'a pas cessé . Aux ismes traditionnels est venu s'ajouter le fictionnalisme pour désigner une doctrine universelle, formulée par Vaihinger, selon laquelle nos conceptions et nos théories sont construites sur des fictions . Les écrits d'antiréalistes notoires comme Nancy Cartwright* (« How the law of physics lie ») ou Bas van Fraassen* (« The scientific image ») ont marqué la philosophie des sciences des cinquante dernières années.

Le Symbolisme*, l'Abstraction*, le Formalisme*..... la Cybernétique* se développent sur ce fond idéologique commun à tout le XX^e siècle. Par sa démarche modélisatrice, constructiviste et abstraite, la cybernétique* a joué un rôle essentiel dans le développement du fictionnalisme.

Le débat s'enrichit plus récemment de l'apport des sciences cognitives*.

FIGURE

Au sens strict c'est le visage (l'aspect, l'expression) donné à un concept ou à un objet. C'est la concrétisation de la notion de forme*. D'où l'usage multiple du mot figure.

Appliqué au visage lui-même le terme en caractérise l'expression. Une bonne ou une triste figure.

FIGURE (SENS)

Le sens figuré apparaît lorsque l'on distingue le sens d'une phrase ou d'un mot, sens littéral*, du sens de l'énonciation du locuteur. Cette distinction correspond à la distinction du sens commun entre dire une chose et vouloir dire une chose. Le discours figuré est un discours où ce que l'on veut dire ne correspond pas à ce que l'on dit. C'est ce qui se passe lorsque l'on fait usage de la métaphore*.

FILTRAGE

FILTRE

Un filtre est un dispositif qui modifie la composition spectrale* (composantes de Fourier*) d'un signal entrant. Les filtres peuvent être des systèmes linéaires* ou non linéaires.

Dans le cas d'un filtre linéaire la relation entre la sortie et l'entrée s'exprime d'une manière particulièrement simple comme produit de convolution* entre l'entrée et la réponse impulsionnelle.

FINALITE

FINALITE EN CYBERNETIQUE

FLUCTUATION

Au sens naïf, variation imprévisible ou désordonnée d'une grandeur quelconque.

Du latin fluctuare, flotter, le mot fluctuation désigne un changement tantôt alternatif, tantôt indécis, rejoignant alors les sens des mots flottement ou flottant, lorsqu'ils impliquent le hasard ou le désordre.

Au sens physique une fluctuation est un écart au hasard d'une grandeur par rapport à sa valeur moyenne. L'importance des fluctuations peut s'évaluer en calculant leur valeur moyenne et en la comparant à la valeur moyenne de la grandeur. C'est ce que les mathématiciens appellent calculer la dispersion statistique* d'une grandeur aléatoire*.

Selon le point de vue, les physiciens parlent de fluctuations ou de bruit*. Le terme fluctuation est très général et désigne l'ensemble des phénomènes où se manifestent les effets du hasard. Le terme bruit est employé pour désigner les phénomènes aléatoires* considérés du point de vue du signal* et de l'information*. Il est alors naturel de parler de bruits acoustiques, de bruits électriques.....de bruit quantique*.

Lorsque l'on parle de fluctuations on fait plutôt référence aux mécanismes physiques qui les produisent. L'introduction du concept de fluctuation et le développement de la physique des fluctuations sont un des plus grands accomplissements de la physique du XX^{ème} siècle.

La théorie du mouvement brownien* par A. Einstein* et M. von Smoluchowski, et sa vérification par J. Perrin et T Svedberg, ont été des étapes décisives dans la reconnaissance du caractère atomique des phénomènes thermiques (cinétique moléculaire).

D'une manière générale les fluctuations manifestent l'existence de structures discrètes de la matière ou du rayonnement, discontinuités responsables des instabilités qui sous tendent les phénomènes de hasard*. L'existence même des atomes*, des électrons*., des photons*, est révélée par les fluctuations présentes dans les phénomènes auxquels ils participent.

Einstein a érigé un principe fondamental de la physique, principe central même d'une philosophie naturelle* : l'observation de fluctuations d'une grandeur trahit la présence de discontinuités structurales dans les conditions de production du phénomène. Paradoxe, puisque le hasard (désordre) révèle en fait l'existence de formes*, donc l'existence d'ordre. Paradoxe résolu si l'on prend en

compte le fait que l'apparition de formes est liée à une rupture de symétrie, rupture d'homogénéité en particulier.

Enumérons brièvement quelques unes des applications majeures du principe de fluctuation : le mouvement brownien* révèle la structure atomique et moléculaire de la matière, le bruit* de fond électrique révèle la structure granulaire de l'électricité (l'électron), l'analyse des fluctuations dans le rayonnement du corps noir* et le bruit quantique* plaident en faveur de la structure granulaire de la lumière (photons), les fluctuations du vide* interrogent sur la structure du vide quantique*, les fluctuations dans les courants électriques associés à l'influx nerveux révèlent la structure des membranes cellulaires et l'existence de canaux.....

Ce sont les fluctuations qui expriment le mieux le caractère aléatoire* d'un phénomène. Dans chaque exemple les caractéristiques des fluctuations (spectre*) expriment en fait des caractéristiques géométriques et dynamiques des structures sous jacentes. Ainsi la phénoménologie probabiliste s'enracine dans une ontologie structurale. C'est en ce sens que le Hasard* a partie liée avec l'Atomisme* (Cf. Atomisme et hasard*), ce qui crée un pont entre le programme* atomiste et le programme* mécaniste. Un pont franchi dans l'autre sens lorsque les études menées par l'école russe des systèmes dynamiques* montrent que les systèmes de boules dures à collision élastiques (billard, gaz de Lorenz) ont la même instabilité exponentielle que les géodésiques de surfaces à courbure négative, ouvrant la voie à la démonstration du caractère chaotique* du mouvement dans le billard plan. Ainsi l'instabilité stochastique est comme paradigmatiquement liée aux géodésiques des surfaces à courbure négative.

Discontinuité et instabilité s'entrelacent sur une même réalité physique. De ce point de vue, la théorie quantique forme moderne de l'atomisme*, a nécessairement partie liée avec l'aléatoire*. Les discontinuités quantiques appellent l'aléatoire. Mais la microphysique empêche de réduire le hasard à un paradigme corpusculaire en posant avec insistance les énigmes du dualisme onde-corpuscule*.

FLUCTUATION-DISSIPATION (THEOREME) (Cf. REPONSE, Théorie de la)

Théorème de la mécanique statistique qui établit une relation directe entre les propriétés de fluctuation* d'un système thermodynamique et ses propriétés de réponse* linéaire à une perturbation externe. Il est fondé sur l'hypothèse que la réponse d'un

ystème en équilibre à une perturbation extérieure est la même que sa réponse à une fluctuation spontanée

C'est une relation en théorie de la réponse* linéaire entre la fonction de réponse, dont la partie imaginaire mesure la dissipation*, et le fonction de corrélation* des fluctuations. Il existe des théorèmes de fluctuation dissipation dans les cas classique et quantique.

FLUCTUATIONS DU VIDE

Le vide quantique* étant le plus bas état propre* d'énergie d'un champ, n'est pas simultanément état propre* des opérateurs de champ quantique*. En vertu du principe d'incertitude* de Heisenberg l'observable* champ électrique et l'observable champ magnétique présentent des dispersions statistiques* pour l'état de vide alors que leur moyenne est nulle. On appelle fluctuations du vide ces dispersions résiduelles du champ. Le terme fluctuation tendant à donner un statut d'attribut* à cette propriété observable*, il est entendu qu'il ne peut s'agir que de donner une image pour interpréter des effets observables par ailleurs comme l'émission spontanée*, l'effet Lamb* ou l'effet Casimir*.

L'expression exacte de ces fluctuations montre un caractère simultanément ondulatoire et corpusculaire, tout comme c'était le cas pour les fluctuations de l'énergie du rayonnement du corps noir* établies par Einstein, qui manifestaient pour la première fois la dualité onde-corpuscule*.

Le caractère très spécifique des corrélations de ces fluctuations (l'invariance relativiste qui s'y trouve attachée) les rend inobservables en pratique, quoique observables en principe. Ce qui ne fait que renforcer le caractère d'image lorsque l'on cherche à interpréter des phénomènes en terme de fluctuations du vide, à fortiori lorsqu'au lieu des calculs complets de l'électrodynamique quantique* on se limite à des termes de la série de perturbation interprétés à l'aide de particules virtuelles*.

Aussi tentante soit elle, la réalité des fluctuations du vide est mise en doute dans de nombreuses discussions.

FONCTION

Relation entre un attribut* ou une qualité* d'une chose* et un rôle joué par cette chose dans un phénomène* ou un processus*. Entre fonction et forme* il existe souvent une relation étroite. La forme d'un instrument de musique a souvent un rapport étroit avec son fonctionnement.

Ce concept est familier à la chimie* où l'on attribue à certains groupements atomiques dans les molécules un rôle précis dans les réactions chimiques : fonction acide, fonction base, fonction amine, fonction aldéhyde ou fonction cétone.

Ce concept est essentiel en biologie où ce sont souvent des molécules entières, de préférence des macromolécules* (protéines*, enzymes*) qui interviennent dans des processus biochimiques ou biologiques.

FONCTION (en mathématiques)

Un des concepts essentiels des mathématiques, exprimant la correspondance ou relation* entre certaines grandeurs variables et d'autres. Le mot grandeur s'entend ici au sens le plus large, il peut s'agir de nombres réels* ou complexes*, d'ensembles de nombres (points dans l'espace) ou d'éléments d'un ensemble quelconque.

La notion actuelle de fonction s'est développée au milieu du XVIII ème siècle chez Bernoulli* et Euler*.

Dans le cas où l'on fait correspondre deux nombres réels entre eux on parle de fonction réelle d'une variable. Dans le cas où l'on fait correspondre un nombre réel à un ensemble de nombres réels on parle d'une fonction de plusieurs variables. La dérivée* d'une fonction d'une variable réelle est la vitesse de variation de cette fonction, ou encore la direction de sa variation selon la tangente à la courbe représentative. Le gradient* d'une fonction à trois variables est un vecteur* indiquant la direction dans l'espace dans laquelle elle varie le plus rapidement.

FONCTION ALEATOIRE (Processus aléatoire ou processus stochastique)

La notion de fonction aléatoire s'est dégagée dans les années 1920-1930 de travaux en turbulence* en météorologie* et en radioélectricité*. Elle s'est développée sous l'impulsion des très nombreuses applications essentielles qu'elle a trouvée comme le rôle du bruit* dans les mesures et les transmissions des signaux en électronique ou les propriétés statistiques de la turbulence.

Une fonction aléatoire est une variable aléatoire* dépendant d'un paramètre, c.à.d. une fonction d'un paramètre et d'un évènement aléatoire* élémentaire appartenant à un espace d'évènements observables du calcul des probabilités*.

Lorsque le paramètre est interprétable comme un temps on parle de processus aléatoire et si le paramètre est un point d'un espace à plusieurs dimensions on parle d'un champ aléatoire.

Pour chaque valeur du paramètre la fonction est une grandeur aléatoire* avec une distribution de probabilité donnée. Pour chaque éventualité du hasard la fonction devient une trajectoire ou une réalisation(un échantillon) de la fonction aléatoire. Une fonction aléatoire est un ensemble de réalisations. Les trajectoires constituent généralement les observations concrètes que l'on peut faire d'une fonction aléatoire. Par exemple on observe la trajectoire d'une particule dans le mouvement brownien*.

On dit que la fonction est stationnaire* si la valeur moyenne et la dispersion* de la grandeur aléatoire ne varient pas avec le paramètre. Le paysage aléatoire ne varie pas. Une fonction stationnaire est ergodique* si la valeur moyenne est égale à la moyenne selon le paramètre le long de chaque trajectoire. Sur une trajectoire on rencontre le même paysage que pour la grandeur aléatoire.

FONCTION D'ONDE

Fonction de la position et du temps déterminant complètement l'état* d'un objet quantique. Pour bien marquer la différence avec la physique classique la fonction d'onde définit l'état avec la position seulement et non pas avec la position et l'impulsion. La fonction d'onde est solution de l'équation de Schrödinger. Le carré de la fonction d'onde est égal à la probabilité de trouver l'objet quantique dans une position donnée à un instant donné. Cette propriété justifie la dénomination d'amplitude de probabilité*, donnée à la fonction d'onde. Elle constitue une caractéristique étonnante de la mécanique quantique, qui la distingue du calcul classique des probabilités lequel ne fait jamais intervenir d'amplitudes de probabilité et opère directement sur les probabilités elles mêmes. La fonction d'onde permet aussi de calculer les caractéristiques probabilistes des observables de l'objet quantique, en particulier les valeurs moyennes et les dispersions. Comme caractérisation de l'état, la fonction d'onde est un outil d'information mais n'est pas une description détaillée du système. Elle est d'ailleurs en général, pour les systèmes à plusieurs particules, un objet mathématique dans un espace abstrait et non pas dans l'espace-temps ordinaire. C'est un concept différent de celui de l'onde de de Broglie*.

FONCTION ELEMENTAIRE

Les fonctions élémentaires sont les fonctions d'usage courant définies directement par des algorithmes de calcul simples comme les fonctions puissances, polynomiales, les fonctions trigonométriques, la fonction exponentielle.....

FONCTION PROPRE

Vecteur propre* d'un opérateur* sur un espace vectoriel de fonctions.

FONCTION PSEUDO ALEATOIRE (CF. Pseudoaléatoire-fonction*)

FONCTION RECURSIVE

FONCTION SPECIALE

Les fonctions spéciales sont des fonctions qui se rencontrent souvent dans les problèmes de la physique mathématique, en particulier dans la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles linéaires par la méthode de séparation des variables ou par la recherche des fonctions propres* d'opérateurs différentiels, et qui ne peuvent s'exprimer en terme de fonctions élémentaires* et doivent être définies à l'aide de séries ou d'intégrales.

Les fonctions spéciales peuvent être définies et classifiées grâce à la théorie de la représentation des groupes, car les opérateurs différentiels de la physique mathématique présentent habituellement des propriétés d'invariance spécifiques. Ainsi le laplacien* est invariant par rapport aux déplacements de l'espace euclidien et le dalembertien*.est invariant par rapport aux transformations du groupe de Lorentz....Ainsi si un opérateur linéaire est invariant par rapport à un certain groupe de transformation, on peut montrer que les opérations de ce groupe transforment ses fonctions propres en fonctions propres de même valeur propre. De ce fait les éléments du groupe sont représentés par les opérateurs sur l'espace des fonctions propres. Les fonctions propres qui font intervenir les fonctions spéciales sont liées à la représentation du groupe qui laisse l'opérateur invariant.

FONCTION STATIONNAIRE

Fonction pour laquelle toute valeur se trouve dans le même environnement. La corrélation* entre deux valeurs de la fonction ne dépend pas du point mais seulement de la différence des variables. Une

fonction stationnaire du temps est une fonction où la corrélation entre deux valeurs ne dépend pas du temps mais de la durée.

FONCTIONNELLE

La notion de fonctionnelle généralise la notion de fonction en considérant des correspondances entre un nombre et un ensemble de fonctions. Dans le cas le plus simple à une fonction associer un nombre comme c'est le cas pour une intégrale*. Les distributions* sont des fonctionnelles. Le calcul variationnel* étudie les propriétés d'extremum des fonctionnelles.

FONCTIONNALISME

FOND

Au sens commun le fond est l'arrière plan ou le cadre d'un objet ou d'un évènement. Mais le fond n'est pas un concept imposé par la nature, c'est une construction de notre cerveau. Le fait que le fond soit une construction mentale a été révélé par la considération systématique des instabilités fond-figure* chez les gestaltistes*. Le fond est introduit pour satisfaire aux exigences cognitives du cerveau humain. Introduire ou reconnaître un fond signifie avant tout que l'on est en position de représentation* et non pas de situation de mimésis*. Le fond affirme l'aspect fonctionnel de la représentation au dépens de l'aspect de ressemblance. Et ceci dans tous les domaines où la notion de fond est pertinente, en peinture, en musique, en littérature même.

La théorie de l'information comme l'étude de la perception* montrent que toute information ne prend un sens que par l'effet d'une différence, d'un contraste. Le fond est ce qui permet d'établir ce contraste. Le fond est un concept très général qui opère dans la description du monde un découpage simplificateur. Il participe de la stratégie de reconnaissance d'objets. Il dépend du type d'attention que nous portons aux objets et aux évènements. Il intervient dans la distinction que nous opérons entre ce qui constitue un évènement, un phénomène et ce qui se coule dans la normalité*, la banalité, l'insignifiant.

Ainsi en musique, à la différence de l'acoustique, il n'y a pas de sons mais des sonorités, soit des comparaisons entre sons. Un son fondamental peut jouer le rôle de son de référence, comme cela s'entend explicitement dans un concert de sitar indienne où un

musicien est chargé d'entretenir constamment cette référence. Le rapport entre un fondamental et ses harmoniques est du même type. Le diapason est précisément un son de référence.

Tout ceci n'étonnera pas le physicien qui reconnaîtra là une démarche courante dans la physique, où à strictement parler l'espace* n'existe pas en lui-même mais s'avère comme un moyen perceptif ou mathématique pour traduire l'existence des objets et leurs interactions. C'est là une des grandes leçons de la relativité générale* qui montre la non indépendance de la matière et de l'espace, la non autonomie de l'espace. La matière dit à l'espace comment se courber. En l'absence de matière, l'espace est plat, vide* disons nous. C'est la situation normale*. La présence de matière est pathologique, c'est ce qui en fait l'intérêt. La matière est une maladie de l'espace, dit joliment René Thom*. Le vide quantique* est pareillement un fond sur lequel se détachent les excitations du champ sous forme de particules.

FONDEMENT DES MATHÉMATIQUES

En 1879, Frege clarifie le raisonnement logique. Cette formalisation permet de dégager les trois caractéristiques qu'une théorie mathématique devrait avoir: cohérence : impossibilité de démontrer une proposition et son contraire, complétude : pour tout énoncé, ou bien il est démontrable, ou bien son opposé est démontrable à l'intérieur de la théorie, décidabilité : il existe une procédure de décision permettant de tester tout énoncé de la théorie.

Avec Georg Cantor, la théorie des ensembles met à l'avant-plan les ensembles infinis, objets aux propriétés particulières qui demandent une nouvelle approche. Le problème du fondement des mathématiques est devenu particulièrement aigu entre le XIX^e et le XX^e siècle lorsque dans la théorie des ensembles de Cantor* on a découvert des contradictions ou antinomies*, posant la question de leur origine et des méthodes pour s'en débarrasser.

L'antonomie la plus célèbre est due à Russel* et met en jeu le problème de l'appartenance ensembliste à soi même, certains ensembles étant éléments d'eux-mêmes (l'ensemble des objets inanimés est un objet inanimé) et certains ensembles ne l'étant pas (l'ensemble des nombres entiers n'est pas un nombre entier). Elle est illustrée par l'antonomie du barbier qui en ayant décrété qu'il raserait tous ceux qui ne se rasent pas eux-mêmes reste indécis quant à savoir s'il doit se raser lui-même.

Brouwer* considérait ces problèmes liés aux fondements même de la théorie des ensembles dans son attitude vis-à-vis de l'infini. Il a proposé de construire les mathématiques sur la conception de l'intuitionnisme* ne reconnaissant que l'infini potentiel*

Russel* considérait que ces antinomies provenaient de l'utilisation d'arguments ayant le caractère de cercles vicieux, où ce qui contient une variable est une valeur possible de cette variable. Il a entrepris de reconstruire la théorie de Kantor en la développant comme une partie de la logique.

Zermelo* a entrepris la construction d'une théorie axiomatique des ensembles*, un programme repris par Hilbert et ses élèves dans leur tentative de formaliser toute la mathématique, un rêve battu en brèche en 1931 par les théorèmes d'incomplétude de Gödel*.

Ce que l'on nomme la crise des fondements des mathématiques a eu pour effet de stimuler le développement de la métamathématique* et de la théorie de la démonstration.

FORCE

Concept central de la physique moderne exprimant la raison extérieure (la cause) de la variation du mouvement*, par opposition à la physique aristotélicienne où le mouvement* est la recherche d'un but (trouver son lieu naturel). Causalité* contre téléologie*

La force est la cause des modifications du mouvement*, des modifications de la vitesse*, c'est ce qu'exprime la loi de Newton: $\text{force} = \text{masse} \cdot \text{accélération}$. En l'absence de force un mouvement se maintient perpétuellement inchangé (vitesse constante)

Mais la mathématisation de ces concepts a bien souvent renversé le point de vue initial, réintroduisant ou pouvant paraître réintroduire la téléologie aristotélicienne sous couvert des considérations globales associées aux principes variationnels*, aux principes de symétrie* ou d'invariance* et aux lois de conservation*.

C'est en voulant exprimer la transmission des forces que la physique a créé la notion de champ*, de champ quantique* et de champ de jauge*.

FORCE CENTRIFUGE

Force avec laquelle un point matériel en mouvement agit sur un corps (liaison mécanique*) restreignant la liberté de mouvement du point et forçant sa trajectoire* à être courbe*. Elle est égale au produit de la masse par le carré de la vitesse divisé par le rayon de courbure* de la trajectoire. Elle est dirigée selon la normale principale* à la

trajectoire, à partir du centre de courbure (centre du cercle pour un mouvement circulaire). La force centrifuge et la force centripète* sont numériquement égales et de sens opposé, mais appliquées à des corps différents comme force d'action et de résistance.

Donnons comme exemple la rotation dans un plan d'une masse attachée à une ficelle tenue à la main. La force centripète s'exerce de la part de la ficelle sur la masse, la forçant à se mouvoir selon un cercle. La force centrifuge s'exerce de la part de la masse sur la ficelle en la tendant, ce qui manifeste comme un besoin de s'échapper de la masse.

Cette force est un phénomène courant qui se manifeste en voiture dans les virages ou dans les machines à laver le linge lors de l'essorage, sans parler des appareils à centrifuger pour séparer les éléments d'un mélange à l'instar de la chromatographie* ou de la distillation*.

C'est la combinaison de la force centrifuge avec la force centripète qui produit l'orbite des planètes autour du soleil.

La force centrifuge est un concept délicat à formuler en mécanique classique*. Elle s'introduit lorsqu'un mouvement selon une courbe est rapporté à un repère non inertiel*. La force centrifuge est une force d'inertie* (fictive du point de vue d'un repère inertiel*), que l'on introduit dans un repère non inertiel tournant, afin de pouvoir appliquer les lois de Newton valables seulement dans un repère inertiel. La force centrifuge apparaît à cause de l'accélération de rotation dans la direction du centre de rotation. Dans les repères inertiels la loi de l'inertie est vérifiée ; chaque corps a tendance à se déplacer selon une droite à vitesse constante. Pour qu'un mouvement courbe autour d'un centre se produise il faut que le corps soit pourvu d'une accélération, modifiant constamment la direction de mouvement du corps. Ceci signifie que du point de vue d'un repère tournant avec le corps apparaît une force qui tend à arracher le corps de sa trajectoire rectiligne.

FORCE CENTRIPETE

FORCE DE LORENTZ

Force exercée par un champ électromagnétique* sur une charge électrique* ponctuelle. L'action du champ électrique* s'exprime comme le produit de la charge par le champ. L'action du champ magnétique* ne s'exerce que sur une charge en mouvement. Elle est le produit de la charge par le produit vectoriel* de sa vitesse avec l'induction magnétique*

FORCE D'INERTIE

La force d'inertie est une force fictive que l'on peut introduire afin que les lois de la mécanique classique dans un repère non inertiel* y coïncident avec les lois dans un système inertiel. La force d'inertie est une force réelle dans un mouvement relatif accéléré, mais elle n'a pas d'existence réelle dans le mouvement absolu. C'est une force apparente qui agit sur les masses lorsqu'elles sont observées à partir d'un référentiel non inertiel, autrement dit d'un point de vue en mouvement accéléré ou en rotation. Une telle force n'est pas le résultat d'une interaction physique, mais plutôt de l'inertie s'opposant à l'accélération du référentiel lui-même.

La force centrifuge* et la force centripète* sont des forces d'inertie.

Einstein en formulant la relativité générale* voulait faire disparaître la différence entre forces réelles et forces fictives. Dans sa théorie de la gravitation* il montre que la gravité est elle-même une force indistinguable d'une force fictive.

FORMALISATION

FORMALISME

FORME

Avec celui d'être* il n'y a pas plus général que le concept de forme.

La forme désigne cet aspect de l'être qui en marque l'identité en lui assurant spécificité et stabilité. La forme réside dans le stable, ce qui assure l'identité des objets, leur relative permanence. La forme est ce par quoi les choses sont des choses différenciées dans l'écoulement des impressions sensibles. Mais au stable, la notion de forme adjoit celle d'ordre* et de cohérence* d'une part, celle de symétrie (ou de rupture de symétrie*) et d'harmonie* d'autre part. Exister, c'est exister en tant qu'un et le même. Il y a là l'expression d'une totalité qui exprime une différenciation spécifique et une résistance au changement. L'unicité et la cohérence parfaites refermées sur elles-mêmes d'un objet. C'est à travers la définition de la forme et sa reconnaissance que se produit la connaissance de l'être. La forme est une modalité* d'existence de l'être, ce qui fait qu'une chose est ce qu'elle est. Concept que la scholastique latine désignait par quiddité*, tout en introduisant le mot forma, pour rendre les mots grecs idea, eidos, morphe et ritmos. Forma dat esse rei était une formule scholastique. A ce stade linguistique il faudrait adjoindre au mot

forme, les termes de **figure***, de **structure*** (**structuralisme***), et d'espèce, pour équilibrer la diversité anglaise de **form**, **shape** et **pattern**.

La diversité de signification du mot **forme**, qui dérive en partie de sa double origine dans le grec, **morphe** et **eidos**, apparaît dans la diversité des mots que l'on oppose à la notion de **forme** : **contenu**, **matière**, **élément**....

On peut distinguer cinq significations essentielles du mot **forme** :

- **disposition**, **arrangement**, **ordre des parties**. Mots opposés : **éléments**, **composants**, **parties**. C'est le point de vue **structuraliste*** ;
- ce qui est **perçu directement par les sens**. Mots opposés : **contenu**, **signification**. C'est le point de vue de la **Théorie de la Gestalt***.
- **La frontière ou le contour d'un objet**. Mots opposés : **matière**, **substance**.
- **L'essence conceptuelle, la forme substantielle***. Mot opposé : **l'aspect accidentel**. C'est le point de vue de l'**hylémorphisme*** aristotélicien.
- **La forme à priori, c.à.d. selon Kant***, la contribution de **l'esprit à la perception de l'objet**.

Ces différentes significations ont des évolutions historiques distinctes, en particulier dans le domaine de l'esthétique.

La philosophie grecque a montré que la réflexion sur la forme est à la base de deux conceptions du monde.

Une conception où les formes sont données à priori, formes abstraites et transcendantes auxquelles la nature sensible se conforme. C'est la théorie platonicienne des Idées: une idée est ce qui est toujours identique à soi même (stabilité), ce qui est l'unité d'une multiplicité et ce qui est pris comme modèle pour faire une chose ou accomplir une action. Une conception où la diversité de la nature proviendrait de l'assemblage de formes simples données par avance, un **auto assemblage***. Une conception atomistique* du monde. La vision atomique et moléculaire du monde ne procède pas autrement aujourd'hui. Elle renforce des positions très répandues en psychologie où l'on pense que la perception a pour objets immédiats des formes élémentaires (Théorie de la Gestalt*). Vision commune à celle des catégories de l'entendement de Kant* ou à la conception des archétypes* inconscients de Jung*. La conception atomistique domine jusqu'à présent le champ de la biologie moléculaire.

Une autre conception pense que la forme est en puissance dans la matière et s'actualise par la matière sans que l'on puisse séparer la matière de la forme. La forme est un tout qui actualise la matière en s'actualisant. C'est là l'esprit de la doctrine hylémorphique* d'Aristote*, qui donne naissance à une conception où la matière et le mouvement se conjuguent pour créer la forme. La forme est alors un Tout qui transcende la matière et ne résulte pas de la simple addition des propriétés de ses parties. Une propriété émergente*.

Une transcendance qui hante l'histoire de la philosophie naturelle dans l'esprit d'un néo-aristotélisme. Leibniz*, Goethe*, Schelling*, Husserl*, D'Arcy Thomson*, Waddington*, la Gestalt* Theorie, Turing*, Thom* et la Théorie des catastrophes*, en sont les héros.

Cette conception a connu au XXème siècle des développements scientifiques majeurs dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques*, qui a mis en évidence des mécanismes d'apparition de formes (morphogénèse*). Ces mécanismes exploitent la propriété mathématique (physique) de nonlinéarité*, à l'origine du phénomène de transcendance de la forme. Ils exploitent souvent le phénomène de brisure de symétrie* et peuvent se manifester dans des régimes dynamiques loin de l'équilibre (structures dissipatives*). On utilise un modèle particulièrement simplifié de système dynamique*, l'automate cellulaire* pour l'étude de l'engendrement des formes.

La théorie des systèmes dynamiques met de par sa nature qualitative l'accent sur le problème de la forme, car elle est une étude de la forme du mouvement de par son intérêt primordial pour la géométrie et la topologie de l'espace de phase*.

La théorie des catastrophes* envisage la naissance des formes au sein de phénomènes dynamiques critiques dont elle établit l'universalité géométrique. René Thom* et Alain Berthoz, spécialiste de la physiologie de la perception, sont tout à fait d'accord sur deux faits fondamentaux :

La forme est une espèce de dynamique interne

Percevoir une forme c'est simuler un mouvement (Cf. Action-rôle dans la perception)

Grâce à l'ordinateur, on a pu créer des formes nouvelles, comme les fractals*, qui permettent de mieux comprendre les formes reconnues dans la nature.

Du point de vue contemporain, la forme est un compromis entre l'information* (originalité, diversité, surprise) et l'intelligibilité (calculabilité, discursivité, réductibilité à un discours). Trop d'information tue la forme. Un phénomène stochastique* (aléatoire*)

ou chaotique*) n'a pas de forme mathématique, car il est un trop plein d'information non réductible à une représentation mathématique globale compacte. Ce vide de forme le rend rebelle à toute prévisibilité au moyen d'un discours mathématique.

La forme résulte d'une compression* des données. C'est un code*. Toute forme est inscrite dans les faits mais résulte d'un point de vue de l'observateur. Cette compression peut être totale, partielle ou impossible. La partie non comprimable est un bruit*.

Ce vide de forme mathématique associé au hasard* est une des découvertes les plus importantes de la science contemporaine, car elle bat en brèche l'idéal platonicien de la correspondance entre les formes sensibles et les formes intelligibles, qui sous tend en partie le privilège accordé aux mathématiques dans la description du réel*.

Le Vide, quel qu'il soit, est une absence de forme, à la fois par absence d'information et aussi sans doute par excès. Loin d'être Rien, il est au contraire le Vide par surdétermination* au delà du raisonnable. Il a vocation à être un bruit*.

En fait la forme n'est pas une manifestation en soi (une substance* pour ainsi dire), même si elle donne à la matière son caractère de substance selon l'hylémorphisme* aristotélicien. Toute réflexion sur l'absence de forme, comme réflexion essentielle sur les conditions de l'apparition de la forme, souligne le caractère contextuel et relationnel de la forme. La forme ne prend sens que vis à vis d'autres formes ou comparée à la non forme. La non forme est la condition d'existence de la forme. On retrouve là aussi en écho la distinction entre forme accidentelle* et forme substantielle*, que l'on pourrait dénommer forme normale, car elle oppose le normal au pathologique.

« Tout vient du fond et y retourne » disait Joan Miro. C'est que la forme ne prend corps que si elle traduit une différence. Nous ne percevons que des différences, comme l'a si bien exprimé Gregory Bateson dans sa conférence « Form, substance and difference » (1970).

Déjà au début du siècle Ferdinand de Saussure*, créateur de la linguistique, et Ernest Cassirer*, l'auteur des « Formes Symboliques », critiquaient le substantialisme et défendaient la priorité des notions fonctionnelles (qui ne sont pas dérivées des objets mais servent à former le notion d'objet). Ainsi Ferdinand de Saussure écrit dans le texte inédit « De l'essence double du langage » :

« Il y a dans la langue ni signes ni significations, mais des différences de signes et des différences de significations lesquelles
1° n'existent absolument les unes que par les autres (dans les deux

sens) et sont donc inséparables et solidaires ; mais 2° n'arrivent jamais à se correspondre directement. »

Le concept de forme ne prend ainsi son sens véritable que dans le cadre de la théorie de l'information*, où selon le mot de Bateson, l'information est une différence qui fait la différence.

Toutes les expressions artistiques ont recours à la construction de fonds* pour mieux affirmer le forme par contraste et la problématique figure*-fond* mise à l'honneur par la psychologie gestaltiste* est récurrente dans bien des domaines.

Le vide et le fond sont un même combat pour l'expressivité de la forme.

Il est clair que toute phénoménologie de la forme doit tenir compte des mécanismes de perception de la forme (Cf. Perception des formes*).

Une des plus grande découverte du XX ème siècle est de montrer la possibilité de création spontanée de formes au sein d'un système en évolution. C'est l'auto-organisation*.

FORME/CONTENU

FORME/MATIERE (Cf. Hylémorphisme)

FORME SUBSTANTIELLE

Héritée d'Aristote et fortement développée dans la philosophie médiévale, la notion de forme substantielle s'oppose à la forme accidentelle*. La forme substantielle, c'est la forme essentielle, celle qui donne son âme à la substance. Elle oppose donc le normal* au pathologique, et pourrait se dénommer forme normale. Elle participe aussi de la distinction entre attribut et propriété.

L'idéal d'une physique qui expliquerait tout par figures et mouvements avait laissé croire à l'élimination de la notion de forme substantielle comme explication première au moyen de la notion de qualité* (la fameuse vertu dormitive dont se moque Molière). En fait le mouvement de dématérialisation dans la physique contemporaine laisse se réintroduire la notion de forme substantielle, sous couvert de l'état fondamental* en mécanique quantique, où l'état se présente comme l'aspect moderne de la forme aristotélicienne (hylémorphisme*).

De ce point de vue le vide quantique est une forme substantielle et les excitations physiques ont pour effet l'apparition de formes accidentelles (états excités).

Dans la Métaphysique (XII), Leibniz, envisageant le rôle explicatif fondamental de la force*, réhabilitait déjà la forme substantielle dans la physique moderne (et par là dans la physique contemporaine) :

« je crois que celui qui méditera sur la nature de la substance...., trouvera que toute la nature du corps ne consiste pas seulement dans l'étendue, c'est à dire dans la grandeur, figure et mouvement, mais qu'il faut nécessairement y reconnaître quelque chose qui ait du rapport aux âmes, et qu'on appelle communément, forme substantielle..... »

FORMULE CHIMIQUE

Expression de la structure d'une molécule, à travers l'enchaînement des différents atomes constituants au moyen de liaisons*

FOURIER (REPRESENTATION DE)

Représentation des fonctions comme somme série de fonctions élémentaires de base, telles les fonctions trigonométriques. Cette représentation, dite analyse harmonique, est l'instrument mathématique majeur de la théorie du signal* et en fait un des outils majeurs de la physique mathématique*.

L'analyse harmonique consiste à représenter une fonction quelconque comme somme de fonctions simples affectées de coefficients (coefficients de Fourier).. La simplicité n'étant pas ici définie comme une simplicité algorithmique mais comme une simplicité de comportement – modification simple ou facile à calculer - lors de transformations linéaires, telles que les réalisent certains dispositifs physiques courants (systèmes linéaires*). Il faut comprendre que l'on a le choix mathématique parmi de très nombreuses représentations de Fourier mais que le choix physique dépend de l'analyseur de la fonction, ce que l'on appelle le dispositif spectral. Dans un très grand nombre de cas de la physique le dispositif spectral impose l'utilité d'une représentation de Fourier et terme de vibrations sinusoidales. D'où l'usage d'appeler spectre la décomposition selon ces fonctions. Elle a par exemple l'utilité de pointer du doigt les vibrations essentielles que verra un résonateur.

Une image extrêmement simplifiée de la situation est donnée par le cas des mains. Soit on considère l'ensemble des dix doigts soit on considère deux fois les cinq doigts des mains, et pourquoi pas l'ensemble de trois doigts et de sept doigts. Cela change tout pour les tricoteuses de gants.

L'analyse harmonique permet ainsi de donner une représentation simple du rapport entre la sortie et l'entrée dans les systèmes linéaires*. C'est une opération mathématique. Cette représentation n'a pas la prétention de décrire les phénomènes réels qui se déroulent à l'intérieur du système, mais de fournir un simulacre* qui permet de calculer facilement les relations entre les entrées et les sorties, le seul phénomène qui intéresse souvent le physicien. Un point de vue qui transforme le système physique en boîte noire*.

Ainsi la représentation de Fourier n'est pas une analyse ontologique mais un outil pour la représentation de l'interaction avec un dispositif physique . La représentation de Fourier constitue une disposition* ou des observables en puissance. Représenter la lumière blanche comme somme de lumières colorées n'implique pas la présence physique de ces lumières colorées dans la lumière blanche, mais permet de décrire simplement le résultat de l'interaction de la lumière blanche avec un dispositif optique linéaire, un prisme par exemple.

Malheureusement cette dérive ontologique, que traduit l'appellation de décomposition de la lumière blanche, est fréquente chez les physiciens et le grand public. Au point qu'il ne faut pas s'étonner de lire aujourd'hui sous la plume de physiciens renommés des mises en garde salutaires contre la chosification des composantes de Fourier. Dans son style si personnel, H. Bouasse, l'auteur d'un immense traité de physique s'exclame :

« à moins d'avoir perdu le plus élémentaire sens commun, il est impossible d'attribuer aux vibrations harmoniques que la série de Fourier met en évidence, une existence objective »

Acoustique générale 1926

Mais la pression des mathématiques dans la physique et les difficultés du langage courant à exprimer la notion de propriété en puissance ont raison de ces avertissements.

FOURIER (TRANSFORMATION DE)

Une fonction dépendant du temps peut être représentée par une série de fonctions trigonométriques avec des coefficients indexés par une variable représentant une fréquence* (représentation de Fourier*). L'ensemble de ces coefficients constitue une fonction de la fréquence, qui exprime le poids de chaque fonction trigonométrique dans la représentation de Fourier. On appelle transformation de Fourier (T.F.) la correspondance entre cette fonction de la fréquence et la fonction initiale dépendant du temps. La transformation de Fourier associe à une fonction son image en fréquences et exprime donc sa composition en fonctions trigonométriques. C'est une sorte de microscope mathématique, révélant le spectre* mathématique des fonctions. La transformation de Fourier est l'outil le plus important de la physique mathématique contemporaine pour autant qu'elle concerne les systèmes linéaires. La T.F. est au cœur de l'appareil mathématique de la M.Q. où elle exprime le dualisme* onde-corpuscule. La T.F. se manifeste expérimentalement dans de nombreux phénomènes comme les figures de diffraction*.

La fonction originale (signal*) peut être donnée sous forme échantillonnée (discrétisée) qui remplace le signal continu par des échantillons relevés à des instants successifs séparés par un pas temporel constant. On définit alors une transformée de Fourier discrète. La transformation de Fourier rapide (FFT Fast Fourier Transform) est une manière de calculer la transformation de Fourier discrète où un regroupement des coefficients permet d'accélérer le calcul d'une manière significative. La transformée de Fourier discrète (TFD) a de nombreuses applications en analyse spectrale et en filtrage, du fait de l'existence des algorithmes de calcul rapide

FRACTAL

FREQUENCE

La fréquence d'un phénomène périodique est le nombre de périodes* par unité de temps. C'est la caractéristique essentielle de tous les phénomènes périodiques quelle que soit leur nature physique.

FRONCE (Cf. Pli et fronce*)

FROTTEMENT

Le frottement est d'une manière générale ce qui s'oppose au mouvement mécanique.

Le frottement externe est l'interaction mécanique entre deux corps solides qui apparaît dans la zone de contact et s'oppose au déplacement relatif de ces corps l'un contre l'autre, en provoquant un dégagement de chaleur*.

Le frottement interne est l'ensemble des processus qui accompagnent la déformation des corps solides, liquides ou gazeux et provoquent une dissipation* de l'énergie mécanique. Dans le cas des liquides et des gaz ce phénomène s'oppose à l'écoulement et porte le nom de viscosité* ; il s'oppose aussi au déplacement d'un corps solide en leur sein.

Dans le cas du mouvement brownien* d'une particule lourde dans un milieu liquide, ou d'une particule soumise à une force aléatoire, ou bien encore du déplacement d'un solide dans un liquide, le frottement s'oppose au déplacement de l'objet en mouvement. Il est proportionnel à la vitesse.

Le déplacement des électrons dans un milieu conducteur est soumis à une résistance ce qui provoque un dégagement de chaleur (Effet joule).

Il existe en général une relation entre le frottement dans le cas d'une force aléatoire et les caractéristiques de corrélation du processus aléatoire*, appelée relation de fluctuation-dissipation*.

Que le frottement soit nécessaire au mouvement* pour en assurer la stabilité* est une idée qui remonte à Aristote* mais qui a ressurgi au XIX^e siècle dans les travaux sur la régulation* automatique des machines à vapeur. C'est en fait devenu une des conceptions essentielles de la philosophie naturelle contemporaine, toute paradoxale qu'elle soit, puisqu'en fait c'est ce qui empêche le mouvement qui en contrôle l'existence.

FULLERENE

GALAXIES

GAMETES (Cellules germinales ou sexuelles)

Cellules reproductives, spermatozoïde ou ovule, contenant les chromosomes, et dont la division et la fusion produit un zygote* et forme un nouvel organisme*. On suppose habituellement une stricte séparation entre le germe et le soma*.

GENE

**Séquence d'ADN codant pour un polypeptide (protéine*)
donné.**

Un gène est une entité stable, mais peut cependant subir une modification dans la suite des nucléotides. C'est ce que l'on appelle une mutation*. La nouvelle forme de gène est héritable comme la première. Les gènes se trouvent alignés sur les chromosomes*. Les gènes sont portés par une molécule d'ADN*, où ce sont les séquences de nucléotides* qui codent pour les séquences d'acides aminés d'une protéine. Ce code* est le code génétique*

Avant la biologie moléculaire*, on avait élaboré le concept de gène, d'« unité d'hérédité ». Apparue au début du XXe siècle, la génétique* en tant que discipline reposait sur l'idée qu'il existait des unités d'hérédité (les gènes) qui restaient stables au fil des générations, qui se reproduisaient elles-mêmes, et qui guidaient le développement des traits physiologiques. On ignorait alors tout de leur support physique, mais les gènes étaient néanmoins des entités bien réelles. Et ils le sont restés pendant presque un demi-siècle, quand bien même on ne savait pas les identifier. Oswald Avery et ses collaborateurs ont montré, en 1944, que l'ADN* était le support des gènes. Mais il a fallu attendre l'annonce triomphale de James Watson et de Francis Crick en 1953, pour que la biologie moléculaire donne un visage à ces éléments d'hérédité, les concrétise : les gènes se répliquent parce que l'ADN est constitué de deux brins complémentaires, et ils sont stables au fil des générations en raison de l'appariement de ces deux brins. Dès lors, il n'y avait rien d'étonnant à ce que l'ADN soit ensuite l'objet de tant d'attentions, pour ne pas dire l'unique objet d'attention. D'où l'emprise de la biologie moléculaire*. Cette époque de la génomique* semble révolue.

Plus on avance , plus la recherche de « bouc émissaire » et de causalité simple s'évanouit (Cf. Evolution biologique*)

GENERATEUR CENTRAL DE RYTHME (Central pattern generator)

Groupe de neurones* qui engendre des commandes motrices périodiques pour des mouvements rythmiques comme la locomotion (Cf. Rythmes biologiques*). Il engendre des mouvements oscillatoires indépendamment d'afférences nerveuses (auto-oscillations*) auxquels serait due l'alternance répétée de la flexion et de l'extension des membres pendant la locomotion.

Comme pour tous les robots physiques doués de locomotion le rôle de la rétroaction* joue là un rôle primordial, permettant de s'adapter à des conditions variées de locomotion (obstacle, changement de pente...).

GENERATION SPONTANNEE

GENETIQUE (Cf. Hérité*)

La génétique est l'étude de l'hérité* mais son nom implique l'ancienne croyance que toute l'hérité est déterminée par les gènes*. Comme on l'a montré dans les derniers temps il existe une hérité épigénétique*, une hérité comportementale et une hérité symbolique. En conséquence nous traiterons de tous les problèmes d'hérité dans les entrées « *Hérité* » et « *Evolution biologique* »

GENOME

Ensemble des gènes* caractéristiques d'une espèce, catalogue de ses chromosomes*.

Les déchiffrements de génomes ont été au cœur de l'entreprise scientifique de la fin du siècle. Le projet du déchiffrement du génome humain en constituait l'apothéose. Le résultat fut décevant car on ne trouva que trente mille gènes pour coder l'humain, à peu près autant que pour coder bien d'autres espèces. Toute la génétique n'est pas dans le code génétique*.

GENOMIQUE

On désigne par génomique un cadre de pensée présentant la biologie moléculaire* sous une forme schématique simplifiée, où le génome* joue un rôle central et exclusif. Une telle situation a pu s'installer dans la fin du siècle dernier de par la fascination de l'aventure du déchiffrement du génome. Le gène* est devenu un déterminant universel dans une correspondance stricte génotype* phénotype*. A chaque gène correspond un trait du développement biochimique ou physique de l'organisme. Un gène du diabète, un gène des yeux bleus. Quelques correspondances très restreintes (maladies génétiques) et la publicité faite autour des manipulations génétiques de la biotechnologie ont contribué à conforter cette image auprès du public et même auprès de certains biologistes.

Mais il s'avère que la correspondance entre génotype et phénotype n'est pas biunivoque. Tout génotype peut correspondre à différents phénotypes. Différents génotypes, souvent l'action combinée

de plusieurs gènes, correspondent à un phénotype donné. La génomique ignore cette complexité, non par ignorance des biologistes, Mais par un certain pragmatisme qui pousse à concentrer ses efforts sur le plus simple avant d'aborder le plus complexe. L'histoire des sciences est riche en démarches de ce genre, l'exemple frappant étant fourni par la mécanique classique hamiltonienne* qui ignore le frottement*. Une telle décision stratégique entraîne sans le vouloir l'emploi d'un langage et une présentation des résultats de recherche qui simplifient par trop la relation entre les gènes et les caractères. C'est à modifier ces points de vue que s'emploie la biologie post génomique*.

En effet si l'on songe aux manières dont un seul morceau d'ADN peut mener à des protéines différentes, on commence à se demander ce qu'est véritablement un « gène ». Dans son livre « *The century of the gene* » (2000), la philosophe Evelyn Fox Keller écrit:

« ...le gene a perdu une bonne partie de sa spécificité et de sa nature. Quelle protéine doit produire un gène, et dans quelles circonstances ? Comment fait il son choix ? En fait ce n'est pas lui qui choisit mais la dynamique complexe de la régulation dans la cellule toute entière » .*

Il est clair que la relation entre gènes et traits visibles est très différente de celle habituellement présentée au public. L'idée qu'un gène est une séquence d'ADN qui code pour une protéine, et que les variations dans cette séquence peut provoquer des différences dans le phénotype*, est une idée par trop simpliste. Les séquences qui codent vraiment représentent une faible partie de l'ADN, et l'ADN n'est qu'une partie du réseau cellulaire qui détermine la nature des protéines produites. Où et quand cette production a lieu dépend de ce qui se passe dans les autres cellules et des conditions environnementales.

Les réseaux cellulaires et les réseaux de développement sont si complexes qu'il n'existe aucune chance de prédire ce qu'une personne sera en inspectant son ADN. Quoiqu'il ait un pouvoir rhétorique et marchand considérable, le rêve d'une astrologie génétique n'est qu'un rêve. Les gènes ne sont pas des programmes, mais des données traitées comme telles par un programme cellulaire général qui reste à ce jour inconnu.

GENOTYPE

GEODESIQUE

GEOMETRIE

Platon définit la géométrie comme la connaissance de ce qui est toujours et non de ce qui naît et périt.

La géométrie est avant tout la description globale des formes*. Elle apparaît de nos jours comme l'étude des propriétés d'ensembles très divers (tel le plan ou l'espace), dont les éléments sont appelés points, qui restent inchangées sous l'action d'un certain groupe* de transformations. On parle alors de géométries* selon les différents groupes qui interviennent. Ainsi la géométrie euclidienne* est elle déterminée par le groupe des transformations qui préservent les longueurs, le groupe des déplacements euclidiens, la connaissance de ce groupe permettant de reconstituer la géométrie.

Mais depuis Descartes la géométrie s'est progressivement laissée envahir par l'analyse*, laissant aux manipulations analytiques et algébriques le soin de régler tous les problèmes, au péril de voir s'évanouir le problème fondamental de la forme. La géométrie est devenue une science générale dans des espaces abstraits, où l'intuition et la vision cèdent le pas au calcul. Les ouvrages de géométrie se sont remplis de calcul et se sont vidés d'images. Emportée dans le mouvement d'axiomatisation, de généralisation et d'abstraction qui caractérise les mathématiques modernes, la géométrie s'est enrichie en envahissant de nouveaux territoires mais a perdu un peu de son âme.

Mais sous l'influence de la physique qui fait un usage massif de formalismes géométriques abstraits pour mieux appréhender la globalité des phénomènes, en électromagnétisme, en relativité restreinte et générale, en théorie quantique des champs et des particules élémentaires, la géométrie revient au premier plan. La mécanique classique* et la théorie des systèmes dynamiques* sont à l'origine du développement d'une doctrine géométrique très générale : la géométrie symplectique*.

L'avènement de l'ordinateur et des écrans graphiques a remis à l'honneur la géométrie et la topologie* dans l'espace ordinaire de dimension 3.

La géométrie est platonicienne lorsqu'elle ne s'intéresse qu'aux formes accomplies. Mais toute tentative d'explicitation de la morphogénèse* est forcément aristotélicienne. L'information* contenue dans un objet géométrique caractérise « l'espace de liberté » de la forme. La forme en acte dans l'espace des possibles. Informatiser la géométrie ou géométriser l'information. C'est dans cette dialectique* qu'il faut sans doute replacer l'unité du trio « action-entropie-information » qui sous tend toute morphogénèse.

GEOMETRIE AFFINE

GEOMETRIE ALGEBRIQUE

GEOMETRIE ANALYTIQUE

Partie de la géométrie où les figures géométriques les plus simples sont étudiées par les méthodes de l'algèbre et de l'analyse grâce à l'emploi d'une représentation au moyen de coordonnées*. Le premier exposé complet de cette méthode se trouve en 1637 dans la « Géométrie » de Descartes*.

Dans la géométrie analytique, aux lignes et aux courbes correspondent des équations entre leurs coordonnées, et les propriétés géométriques sont décrites en étudiant les propriétés analytiques* et algébriques* de ces équations. Ainsi les courbes* sont représentées par des fonctions* et aux fonctions correspondent des courbes.

La géométrie analytique est une technique d'étude des propriétés géométriques à laquelle on a souvent reproché de perdre l'esprit de la géométrie* pure.

GEOMETRIE DIFFERENTIELLE

Partie de la géométrie qui étudie les espaces courbes (surface d'une pomme). Approche géométrique de l'analyse tensorielle*, inaugurée par les travaux de Sophus Lie* et Elie Cartan*.

Ce que l'on recherche en géométrie différentielle : c'est de faire du calcul différentiel sur des espaces autres que l'espace euclidien* \mathbb{R}^n , comme la sphère. Les formes géométriques sont étudiées par les méthodes de l'analyse mathématique*.

On commence par donner une définition des espaces où l'on peut faire ce calcul différentiel, et que l'on appelle variété différentiable. Ensuite, on réécrit les règles de calcul que l'on connaît sur \mathbb{R}^n , comme les dérivées partielles de fonctions, l'intégrale, etc.. mais avec le souci constant de définir des opérations et des objets qui soient indépendants du système de coordonnées choisies.

Une variété différentiable de dimension n est un ensemble de points qui au voisinage de chaque point ressemble à \mathbb{R}^n . On souhaite donner une définition interne (ou intrinsèque) d'un tel espace, sans le supposer inclus dans un espace euclidien plus grand.

Par exemple, pour définir la surface de la terre sans la décrire comme une sphère dans \mathbb{R}^3 , on la décrit comme un ensemble de cartes géographiques qui recouvrent sa surface (comme le faisaient les premiers explorateurs), avec un système de coordonnées sur chaque carte, et des formules de changement de coordonnées qui permettent de passer d'une carte à la carte voisine. Chaque carte est un domaine

de \mathbb{R}^2 . C'est H. Weyl en 1913 qui a donné la première définition intrinsèque de variété différentiable,

Les objets de base sont les variétés différentiables, les champs de vecteurs, les formes différentielles*, les espaces fibrés et les connexions*. La géométrie différentielle fournit avant tout un sens esthétique pour la structure des mathématiques modernes. Poincaré* distinguait deux types de mathématiciens : l'analyste et le géomètre.

La géométrie différentielle est au cœur de la mécanique hamiltonienne*, qui est une géométrie dans l'espace de phase*. Une structure géométrique caractérisée par la présence de variables de phase par paires canoniquement conjuguées, une structure symplectique*. Le langage de la théorie des systèmes dynamiques*.

Ce langage des variétés différentiables est inévitable en relativité générale*.

Les champs de jauge* dans la théorie des particules élémentaires* sont des connexions dans les fibrés à base espace-temps.

GEOMETRIE ET NOMBRE

D'un point de vue « physique » la géométrie* est le problème des objets dans l'espace. (Cf. Géométrie et physique*) (Cf. Géométrie et réalité*)

D'un point de vue « mathématique », la géométrie* est le résultat d'un élargissement progressif de la notion de nombre. Elargissement qui consiste à considérer comme des nombres des ensembles de nombres, et à définir sur ces objets nouveaux des calculs ou des opérations appropriés. Un ensemble de deux nombres ordinaires est considéré comme un nombre complexe*, et son interprétation géométrique consiste à le considérer comme un objet unique, un vecteur*, une flèche joignant un point origine à un point du plan dont les deux nombres initiaux sont les coordonnées* (l'abscisse et l'ordonnée). Et de définir un calcul vectoriel*.

La géométrie, c'est ce processus de généralisation et de globalisation, donnant à des êtres nouveaux une autonomie opératoire.

Ainsi si un vecteur c'est un ensemble de deux nombres, c'est aussi beaucoup plus, dans la mesure où l'on peut faire subir à ce vecteur une rotation directe, comme pour l'aiguille d'une montre, sans calculer les deux nombres qui correspondent à la position du nouveau vecteur. Tourner peut ainsi se faire directement ou en calculant. La géométrie à proprement parler consiste à faire tourner directement par un calcul formel, « opération physique ou symbolique », sans passer par les nombres. Cette conception de la géométrie, latente tout

au long de son histoire, n'a pris corps qu'au XIX^{ème} siècle. Mais son idéal avait été largement entrevu par Leibniz*, dans une lettre (en français) à Huygens*, datée du 8 Septembre 1679.

Leibniz forme le projet d'un langage universel des figures. Calculer avec les figures comme on calcule avec les nombres.

« Mais après tous les progres que j'ay faits en ces matieres, je ne suis pas encore content de l'Algebre, en ce qu'elle ne donne ny les plus courtes voyes, ny les plus belles constructions de Geometrie. C'est pourquoy lorsqu'il s'agit de cela, je croy qu'il nous faut encore une autre analyse proprement géométrique ou lineaire, qui nous exprime directement situm, comme l'algebre exprime magnitudinem. Et je croy d'en avoir le moyen, et qu'on pourrait représenter des figures et mesme des machines et mouvements en caracteres, comme l'Algebre représente les nombres ou grandeurs ; et je vous envoie un essay qui me paroît considerable. Il n'y a personne qui en puisse mieux juger que vous, Monsieur, et vostre sentiment me tiendra lieu de celuy de beaucoup d'autres »

Et d'esquisser les principes d'un tel calcul.

Dans sa réponse Huygens exprime son scepticisme.

« J'ay examine attentivement ce que vous me mandez touchant votre nouvelle caracteristique, mais pour vous l'avouer franchement je ne conçois pas, par ce que vous m'en estalez, que vous y puissiez fonder de si grandes esperances ».

Les conceptions de Leibniz ne seront publiées qu'en 1833 et feront l'objet d'un concours en 1844 : « Créer un système réalisant le projet de Leibniz ». Ce système avait en fait déjà été créé et publié cette même année par un mathématicien allemand Grassman, qui concourut et eu le premier prix.

Réalisant le projet de Leibniz, Grassman ouvre au XIX^{ème} siècle la voie au développement du calcul vectoriel, dont les conséquences seront incalculables pour la géométrie et la physique.

Si la figure est une extension du nombre, le calcul des figures opère un mouvement inverse en considérant la figure comme un nombre « complexe ».

Un aller et retour où le nombre devient géométrie et la géométrie se fait nombre. L'histoire d'une grande respiration.

GEOMETRIE ET PHYSIQUE

Avis du raton laveur : après avoir murement réfléchi il préconise le maintien de cet article pour donner au lecteur un parfum de la situation épistémologique de la physique contemporaine.*

Les rapports entre la géométrie* et la physique* sont aussi anciens que les débuts de toute culture, dans la mesure où leur objectif commun est la représentation globale* des formes* dans l'espace. C'est cette problématique de la globalité qui scelle l'alliance entre physique et géométrie, en introduisant aux fondements de chacune, des objets abstraits* communs comme la droite, le plan ou la sphère, et en mettant au premier plan l'importance des transformations dans l'espace (symétries*) dans l'expression des lois fondamentales.

La mécanique classique* concrétise en son cœur un certain nombre de concepts géométriques. Elle exprime à l'aide de vecteurs* la loi fondamentale de la dynamique qui relie l'accélération aux forces agissantes. Ce mode de représentation géométrique de l'action physique est bien adapté, car il permet de rendre compte de sa direction, de son intensité et de son point d'application. L'existence de quantités conservées (lois de conservation*), comme l'énergie, l'impulsion ou le moment cinétique sont liés à l'existence de propriétés de symétrie spécifiques. La mécanique classique a joué un rôle déterminant dans la formulation du calcul des variations* qui vise à déterminer la forme optimale d'un objet mathématique. La courbe de la trajectoire y est déterminée par sa forme globale et non pas par la position de ses points.

Mais la mécanique classique en se généralisant dans la théorie des systèmes dynamiques* a popularisé l'emploi d'un espace de représentation abstrait, l'espace de phase*, qui présente une structure géométrique particulière due à la présence de variables qui se présentent sous forme de paires canoniques conjuguées : la structure symplectique*. On a ainsi pu dire que la mécanique hamiltonienne* est une géométrie dans l'espace de phase, une géométrie symplectique*.

La mécanique classique des milieux continus et l'hydrodynamique sont à l'origine d'une notion nouvelle, celle de champ* qui va s'avérer, en particulier lors du développement de l'électromagnétisme* un objet géométrique particulièrement riche.

L'électromagnétisme est fondé sur le couplage de deux champs de vecteurs*, le champ électrique* et le champ magnétique*, qui s'exprime naturellement à l'aide d'opérations différentielles vectorielles, qui donnent aux équations de Maxwell* leur identité particulière, comme équations du champ électromagnétique*. L'invariance des équations de Maxwell par le groupe de transformation de Lorentz* ouvre la voie à la Relativité restreinte*. L'électromagnétisme et la relativité restreinte inaugurent un mouvement plus vaste que l'on peut appeler « géométrisation de la physique ». L'espace-temps* inaugure une géométrie nouvelle quadridimensionnelle non euclidienne. La théorie de la relativité générale* d'Einstein et les travaux de mécanique céleste de Poincaré sont aussi à l'origine de ce mouvement. En simplifiant à l'extrême on peut dire qu'il y a là un rapport nouveau entre la physique et les mathématiques. D'une conception locale qui s'exprime par l'analyse mathématique* la physique évolue vers des conceptions globales qui se décrivent mieux en terme de géométrie* et de topologie*. Le rôle croissant de la théorie des groupes* dans la physique contemporaine n'est qu'une première étape dans cette évolution.

La relativité générale*, avant de jouer réellement un rôle dans le développement de la cosmologie*, a servi de laboratoire pour l'élaboration de conceptions de la physique comme une géométrie, ou bien encore de la géométrie comme une branche de la physique. On peut dire d'une manière imagée que l'espace y indique à la matière comment se déplacer, ou encore que la matière indique à l'espace comment se courber.

Ou comme le disait encore René Thom*, la matière est une maladie de l'espace.

C'est naturellement à propos des problèmes d'espace temps et de gravitation que la géométrie a pris une importance considérable dans la physique. Ceci a été rendu possible par les travaux de grands géomètres : Lobatchevsky*, Gauss*, Riemann* et Clifford*, dans la première moitié du XIXème siècle.

Il y a trois approches fondamentales dans la construction d'une géométrie :

L'approche de Klein*, qui suppose que l'espace est homogène. Toutes les propriétés des objets géométriques sont décrites par le choix d'invariants des groupes de symétrie de l'espace.

L'approche de Riemann*, qui ne suppose aucune symétrie de l'espace. Les caractéristiques des objets géométriques se construisent pas à pas à partir d'expressions différentielles locales. L'espace total est reconstitué à l'aide de coefficients de connexion.

L'approche de Cartan*, où l'espace dans sa globalité est un ensemble d'espaces de Klein locaux et homogènes, associés à chaque point d'un espace de Riemann et liés entre eux par des coefficients de connexion généralisés.

L'idée que toute quantité physique doit être descriptible par un objet géométrique et que les lois de la physique doivent toutes se ramener à des relations géométriques trouve ses fondements intellectuels dans le programme d'Erlangen* de Félix Klein* (1872), établissant la relation entre géométrie et groupes* de transformation.

Cette idée se concrétise chez Einstein* dans le principe de covariance générale de la relativité générale*(1916) et dans les écrits d'Hermann Weyl* (1925)

Dans la doctrine géométrodynamique de Wheeler*, il n'y a rien dans le monde excepté un espace vide courbe, et la matière, les charges, les champs ne sont que des manifestations de la courbure* de l'espace. Résurgence de la doctrine de Descartes* sur l'étendue comme une substance ? Revanche du géomètre sur l'analyste, comme les opposaient Poincaré* ?.

En introduisant la notion de nombre quantique* qui se conserve au cours des interactions, la mécanique quantique introduit en plus des symétries d'espace temps la notion de symétrie interne* et d'espace interne*. C'est là le début d'un intense intérêt des physiciens pour la théorie des groupes, une particule élémentaire étant associée à une représentation du groupe de symétrie interne qui dépend de l'interaction étudiée.

Cela a suggéré d'ajouter aux variables de position dans l'espace temps un paramètre d'espace interne*, la jauge*, et d'introduire la notion d'invariance de jauge* des lois physiques assurée par un champ de compensation locale, le champ de jauge*. Le champ de jauge dans les différentes théories est un objet géométrique abstrait, « une connexion sur un fibré vectoriel principal ». Un nouveau type d'application de la géométrie à la physique est ainsi né, avec l'utilisation de la géométrie différentielle* moderne dans la description des champs de jauge*, et son extension à des problèmes variés dans la théorie des cristaux liquides, la théorie des transitions de phase*, la théorie de la superfluidité* ou l'étude de certaines équations d'onde non linéaires importantes en physique.

Tout ceci se reflète bien dans les différentes formes d'écriture des équations de Maxwell et de représentation du champ électromagnétique classique.

A la fin du XIX^{ème} siècle la forme d'écriture des équations de Maxwell utilise les opérateurs divergence et rotationnel (Cf. Calcul vectoriel*)

Au début du XX^{ème} siècle on utilise des notations tensorielles quadridimensionnelles. Au milieu du siècle l'écriture caractéristique a recours au produit extérieur et au coproduit. A la fin du siècle il se pourrait qu'il soit préférable d'utiliser une autre écriture algébrique fondée sur le produit de Clifford.

Parallèlement la représentation du champ a évolué.

Dans une première étape le champ de Maxwell est l'ensemble de deux champs spatiaux, variables dans le temps. L'un est le champ du vecteur électrique*, l'autre le champ du vecteur axial de l'induction magnétique*.

Dans une deuxième étape le champ de Maxwell est une 2 forme extérieure fermée sur l'espace temps.

Dans une troisième étape, le champ de Maxwell est un champ de jauge* soit une connexion dans un fibré vectoriel sur l'espace temps.

Le rôle croissant de la géométrie en physique contribue à renforcer le sentiment d'objectivité* qu'assure notre confiance dans l'intuition spatiale si abstraite soit elle. La physique change d'esprit, persuadée que la réponse aux problèmes fondamentaux viendra de la géométrie. On peut toujours en douter, mais c'est dans ce sens en tout cas que se comprennent tous les programmes de théories unitaires* en physique.

GEOMETRIE ET REALITE (Géométrie et espace)

Depuis Euclide* la géométrie a un statut à part dans les mathématiques, de par la confiance qu'elle inspire à cause de son axiomatisation. C'est cette axiomatisation qui assure que plusieurs personnes différentes arrivent aux mêmes conclusions logiques, à partir du moment où elles s'accordent sur les axiomes. Pour Platon* dans « *La République* », la géométrie a pour objet la connaissance de ce qui est toujours et non de ce qui naît et de ce qui périt. Mais cette rigueur induit un doute : la géométrie n'est elle que le produit de notre imagination ou se réfère-t-elle à des objets de la réalité ? Cette interrogation hante l'histoire des sciences. Quel rapport existe-t-il entre la géométrie et l'espace ?

L'espace aristotélien est essentiellement qualitatif et concret. Il est en effet associé au cosmos fini et parfait, en conséquence de quoi il

est un espace hiérarchisé, qui comporte des directions a priori (droite, gauche, bas, haut). Quand on traite un problème particulier de physique, il est toujours nécessaire de tenir compte de l'ordre du monde, de considérer la région de l'être (la place " naturelle ") à laquelle un corps donné appartient par sa nature même.

La révolution scientifique du XVII^e siècle, inaugurée par Galilée*, se veut en rupture complète avec la conception du monde aristotélicienne. Il abandonne la connaissance du monde fondée sur l'expérience, la perception des sens, et l'imagination, pour la remplacer par la pensée pure. L'espace n'est plus qualitatif. L'espace réel est, dans la physique moderne, mathématique, c'est-à-dire qu'il n'est pas immédiatement perceptible, il se cache au-delà des apparences. Il est identifié à celui de la géométrie (euclidienne) dont il emprunte toutes les propriétés.

Descartes*, qui introduit dans l'espace géométrique la notion mathématique de coordonnées, tente bien de donner une réalité à l'espace, en identifiant la matière et l'étendue. Newton* considère l'espace absolu par nature sans relation à rien d'extérieur et demeurant toujours le même, comme un cadre neutre pour les phénomènes, et auquel nous ne pouvons avoir accès que par l'intellect.

Au XVIII^e siècle les mathématiciens cherchaient à affermir les principes philosophiques et méthodologiques des mathématiques en les distinguant des principes de la physique. Témoin Euler* qui dans sa Mécanique distingue ainsi deux approches du concept d'espace celui de mathématiciens et celui des physiciens.

Kant qui cherche à concilier toutes ces conceptions, en distinguant entre noumène inaccessible à l'expérience et phénomène, et en renversant le point de vue sur le monde par l'introduction du sujet, fait de l'espace un absolu préexistant dans la conscience comme possibilité de la connaissance. Nous n'avons un concept des corps qu'en tant qu'ils sont des phénomènes, et comme tels ils présupposent nécessairement l'espace comme la condition de la possibilité de tout phénomène extérieur. Au contraire de Kant, un savant comme Boskovic* refusait de considérer l'espace comme une condition de la possibilité des objets et des corps, en considérant au contraire la relation dynamique des substances en général comme la condition de la possibilité de l'espace. Pour Kant la géométrie euclidienne est un a priori*.

Le réveil a été brutal avec l'apparition des géométries non-euclidiennes*. On connaît la position conventionaliste* de Poincaré*selon lequel « on ne peut ni réfuter ni confirmer les propositions de la géométrie à l'aide de l'expérience. » Lorsque

Lobatchevski essaie de vérifier le caractère euclidien de l'espace en mesurant les angles constitués par deux points du diamètre de la terre et Sirius, il reste dépendant des lois de propagation des rayons lumineux. Ainsi, un écart à la règle : « la somme des angles d'un triangle est égale à deux droits » peut autant être interprétée comme la manifestation du fait que les trajets lumineux sont rectilignes dans un espace non euclidien que comme le fait que dans un espace euclidien, les trajets lumineux ne sont plus rectilignes. Par conséquent, parler de la 'réalité' d'un espace euclidien ou non euclidien n'a pas de sens. Ce qu'il y a lieu d'examiner serait plutôt dans quelle mesure l'utilisation d'une géométrie donnée est conciliable avec l'expérience et si cette géométrie est potentiellement *féconde*.

C'est ce qu'a fait Einstein* dans la relativité générale* en reliant la courbure* de l'espace-temps* à la matière*, ce qui ne peut se produire dans un espace euclidien*, forcément plat.

Einstein s'est exprimé sur le rapport entre la géométrie et l'expérience. Selon lui, pour autant que les lois mathématiques se réfèrent à la réalité, elles sont incertaines ; pour autant qu'elles sont certaines, elles ne se réfèrent pas à la réalité. C'est l'axiomatisation des mathématiques, en particulier par la logique formelle, qui les vide de tout contenu intuitif et expérimental. L'entreprise bourbakiste* lui donne raison. Ainsi présentées les mathématiques ne peuvent rien prédire sur les objets de la perception ou les objets réels. Dans une géométrie axiomatisée les mots, *point* ou *ligne droite* sont des concepts vides. Ce qui leur fournit de la substance n'a rien à voir avec les mathématiques. Il faut pour cela ajouter une proposition :- les corps solides sont reliés entre eux par leurs dispositions comme le sont les corps dans la géométrie euclidienne. C'est alors que cette géométrie contient des affirmations sur les relations entre les corps. Ainsi augmentée la géométrie devient une science naturelle. On peut en fait la considérer comme la plus ancienne branche de la physique. On peut appeler cette géométrie complétée « géométrie pratique » en la distinguant de la « géométrie purement axiomatique ». La question de savoir si la géométrie pratique de l'univers est euclidienne ou pas prend alors une signification claire ; seule l'expérience peut répondre à cette question. Sans ce point de vue, dit Einstein, je n'aurais pas pu formuler la théorie de la relativité*. Il se rallie alors au point de vue conventionnaliste de Poincaré* selon lequel ce qui caractérise la géométrie euclidienne c'est sa simplicité et non pas son accord avec la réalité. Lorsqu'il y'a désaccord avec la réalité ce sont les lois physiques qu'il faut changer et non pas l'axiomatique géométrique.

Prenons l'exemple du calcul différentiel absolu, fondé par Gauss*, Riemann*, Christoffel ; on a pu apprécier la fécondité de cette théorie mathématique lorsqu'elle devint le pivot de la théorie de la relativité générale, et plus tard lorsqu'elle permit de développer des domaines plus appliqués tels que la mécanique des milieux continus. Par conséquent, nous ne devons nullement considérer que les objets mathématiques qui sont utilisés dans une théorie physique sont des « copies d'une réalité effectivement donnée » mais bien plus comme des outils qui existent dans notre pensée et qui permettent de construire des représentations du monde extérieur.

La géométrie est l'art de raisonner juste sur des figures mal dessinées. La géométrie est avant tout la description des formes* dans l'espace. Elle est donc simultanément une description mathématique de l'espace et une mathématisation de la notion de forme.

GEOMETRIE EUCLIDIENNE

GEOMETRIE NON EUCLIDIENNE

GEOMETRIE PROJECTIVE

La géométrie projective est l'étude de ce qui, dans les figures, reste inchangé après projection, alors que la géométrie euclidienne* est l'étude de ce qui reste invariant après déplacement.

La géométrie projective repose sur la projection centrale (ou perspective*) et étudie les figures au point de vue de leurs positions respectives et des propriétés invariantes qui les lient dans une transformation géométrique, homothétique* tout particulièrement.

De ce point de vue, la géométrie projective comporte moins d'axiomes que la géométrie euclidienne et par suite elle est plus générale.

La géométrie projective ignore les droites parallèles, les droites perpendiculaires, les cercles, les triangles rectangles, isocèles, équilatéraux, etc ; on peut aussi dire, par exemple, que pour elle, cercles, ellipses et hyperboles ne constituent qu'une seule figure.

GEOMETRIES

GEOMETRIE SYMPLECTIQUE (Cf. Symplectique* (Structure)).

GEOMETRISATION DE LA PHYSIQUE (Cf. Géométrie et physique*)

GESTALT (Théorie de la)

Cette théorie émise dans les années vingt et les années trente par l'école de Graz, énonce que la perception* a pour objets immédiats des formes* élémentaires. Une conception atomistique des formes perçues. Ces formes sont en nombre donné pour telle ou telle espèce et ont été sélectionnées par les mécanisme de l'évolution.

Nous percevons ces formes globalement et n'en distinguons pas les parties. Les « gestaltistes » se sont beaucoup penchés sur certaine illusions d'optique qui corroboreraient selon eux, le fait que le phénomène perceptif a d'abord affaire avec un tout et non avec une somme de parties.

Il y a là une vision commune avec les catégories a priori de l'entendement de Kant*, ou la vision des archétypes* chez Jung*.

GLOBAL

GLUON

Quantum du champ d'interaction forte* entre quarks*.

GLYCOLYSE

GNOSEOLOGIE (Théorie de la connaissance)

Depuis plus d'un siècle les exposés scientifiques se constituent sur un postulat implicite d'objectivité*

Ils décrivent la Nature et omettent de s'interroger sur le discours et sur le locuteur, comme si l'adéquation de ce discours à une réalité objective allait de soi. On laisse aux philosophes le soin de s'interroger sur ces questions. Et lorsque le problème de l'objectivité devient aigu, comme en physique quantique*, l'examen même de ce problème est réputé activité philosophique.

Il n'en reste pas moins inquiétant de ne voir aucun exposé de science précédé ou accompagné de considérations sur la théorie de la connaissance. L'espace*, le temps*, le mouvement*, la causalité*, les nombres*, les figures* relèvent tout autant de l'anthropologie* ou de la psychologie de la perception* ou de la psychologie génétique*.

Toute connaissance se constitue par réponse à des questions dans un cadre défini. En préambule à toute connaissance il y a donc des

problèmes de linguistique et de logique, des interrogations sur le fonctionnement de la pensée*, la formation des concepts* et l'efficacité cognitive de l'analogie*, de la métaphore* et du symbole*. C'est ce que l'on désigne comme « fondements philosophiques » de la science.

Et de fait un nombre important d'œuvres majeures de la philosophie appartient à la théorie de la connaissance.

Descartes*. *Discours de la Méthode*. (en préface à un traité d'optique).

Leibniz*. *Nouveaux essais sur l'entendement humain*.

Locke*. *Essay concerning human understanding*.

Berkeley*. *A treatise concerning the principles of human knowledge*.

Hume*. *A treatise of human nature. Enquiries concerning the human understanding and concerning the principles of morals*.

Condillac*. *Traité des sensations*.

Kant*. *Critique de la raison pure*.

Hegel*. *Phénoménologie de l'esprit*.

Helmholtz*. *Manuel d'optique physiologique*

Mach*. *Analyse des sensations*

Lénine*. *Matérialisme et empiriocriticisme*.

Hertz*. *Principes de la Mécanique*

Cassirer*. *La théorie de la relativité d'Einstein. Eléments pour une théorie de la connaissance*

La philosophie des formes symboliques.

Husserl*. *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*.

Merleau Ponty*. *Phénoménologie de la perception*.

Piaget*. *Introduction à l'épistémologie génétique*.

On retrouve à propos de la connaissance le dilemme entre réalisme* et idéalisme*. Pour les uns la connaissance est un processus essentiellement réceptif : le sujet n'est qu'une capacité d'être affecté par une action venue du dehors. Sous sa forme la plus radicale, comme dans le matérialisme dialectique*, elle présente la connaissance comme un simple reflet* de la réalité extérieure. Pour les autres la connaissance n'est que la prise de conscience par le sujet de l'activité de la pensée* qui s'exerce en lui, une élaboration dans laquelle le sujet a la priorité. La phénoménologie transcendantale* s'est efforcée de surmonter cette opposition, en éliminant l'idée de représentation* au profit du concept d'intentionnalité*. Elle discrédite la pensée objective car celle-ci élimine l'objet premier de la connaissance intuitive.

Cette considération des rapports sujet-objet apparaît dans les « formes symboliques » de Cassirer*, qui sont des formes de pensée ou des régimes de déploiement de la connaissance. Cassirer distingue trois formes : la pensée mythique*, la pensée langagière, la pensée scientifique, correspondant à trois types de rapport sujet-objet, la fusion, la séparation, la disparition de l'objet. Cette disparition au profit de l'abstraction* correspond sans doute à une recherche de stabilité structurelle* (Cf. Stabilité structurelle- problématiques et enjeux). La science est une connaissance de non objets, une connaissance abstraite au moyen de symboles* comme le proclament Helmholtz et Hertz. Hertz a accompli la conversion de la « théorie de la connaissance comme copie » en une pure « théorie du symbole ».

Au XX^e siècle la théorie de la connaissance, outre la phénoménologie*, présentera quatre aspects :

Le positivisme logique* (Wittgenstein*, Carnap*) qui met l'accent sur le langage. Pour Wittgenstein la science n'est même qu'un jeu linguistique.

L'épistémologie génétique* de Piaget, qui est à l'origine du constructivisme*.

Le structuralisme*, qui porte à son paroxysme les considérations linguistiques. La sémiophysique* de Thom* est une entreprise structuraliste.

Le cognitivisme* contemporain qui se construit sur plusieurs domaines en effervescence : les neurosciences*, l'intelligence artificielle* et l'informatique*, la dynamique qualitative de la théorie des systèmes dynamiques*. On y souligne le côté actif de la connaissance d'un monde objectif, car la perception* elle-même est un phénomène dynamique.

GNOSTICISME

Courant de la religion chrétienne datant des alentours du deuxième siècle, et qui a joué un rôle fondamental dans la constitution de l'identité chrétienne.

Nos connaissances sur ce mouvement sont fragmentaires, malgré l'importante découverte des manuscrits de Nag Hammadi en 1945. Nos informations proviennent le plus souvent des attaques subies de la part des auteurs chrétiens qui voient là une source d'hérésie.

Le gnosticisme part de la même intuition philosophique qui a guidé la pensée grecque, l'existence d'une dichotomie entre le règne de la vérité et de l'Être éternel, et le Devenir en changement perpétuel. Mais contrairement aux grecs qui cherchaient à réduire cette

dichotomie, les gnostiques l'amplifient et développent une doctrine de l'origine de l'humanité dans le règne de l'Être et de sa chute dans le règne de la matière ou du Devenir.

Les gnostiques se posaient des questions fondamentales sur l'existence* ou l'être au monde (Dasein de Heidegger*) : Qui sommes nous ? D'où venons nous ? Où allons nous ? Questions que s'est posées Gauguin dans une toile célèbre, et qui sont la racine de la pensée philosophique, mais qui offraient aux gnostiques un champ dépassant la pure spéculation philosophique.

La pensée gnostique a eu de nombreuses ramifications, et réapparaît au XX^e siècle dans l'œuvre de Jonas, philosophe existentialiste, élève de Heidegger, chez le psychologue Jung* et dans le courant existentialiste*.

GODEL (THEOREMES D'IMCOMPLETUDE DE)

Preuve publiée par Gödel en 1931 concernant l'existence de propositions indécidables* dans tout système axiomatique* fondé sur une classe d'axiomes* assez riches pour permettre la construction de l'arithmétique*. Le premier théorème, que l'on appelle souvent le théorème de Gödel, établit que dans tout système de l'arithmétique il existe une proposition qui ne peut être prouvée pas plus que sa négation à l'intérieur du système. Le second théorème établit que la consistance d'un système formel de l'arithmétique ne peut être démontrée par des moyens formalisables à l'intérieur du système. En fait ces théorèmes s'appliquent à toute théorie récursivement axiomatisable capable de formaliser l'arithmétique, soit une théorie qui soit formalisée de façon à reconnaître purement mécaniquement les axiomes parmi les énoncés. Grossièrement, le premier théorème énonce qu'une théorie suffisante pour faire de l'arithmétique est nécessairement incomplète, au sens où il existe dans cette théorie des énoncés qui ne sont pas démontrables et dont la négation n'est pas non plus démontrable : c'est-à-dire qu'il existe des énoncés sur lesquels on sait qu'on ne pourra jamais rien dire dans le cadre de la théorie. Sous le même genre d'hypothèses sur les théories considérées, le second théorème affirme qu'il existe un énoncé exprimant la cohérence de la théorie - le fait qu'elle ne permette pas de démontrer tout et donc n'importe quoi - et que cet énoncé ne peut pas être démontré dans la théorie elle-même. Gödel ne démontre pas qu'il existe en arithmétique des propositions vraies mais absolument indémontrables. Il montre plutôt que toutes les propositions vraies de l'arithmétique ne peuvent pas être démontrées dans un seul et unique système formel donné.

À cause des hypothèses des théorèmes, toute théorie qui prétend formaliser l'ensemble des mathématiques, comme la théorie des ensembles*, est concernée. Faut-il pour autant renoncer à ce qu'un discours mathématique ait une valeur de vérité universelle ? Sur quoi se fonder pour savoir s'il est cohérent, puisqu'il semble que l'on ne puisse y arriver par des moyens purement internes aux mathématiques ? Les théorèmes de Gödel ne donnent pas de réponse mais permettent d'écarter celles qui sont trop simples.

Un tel résultat eu pour effet de compromettre la finalisation du programme de Hilbert* sur le fondement des mathématiques*.

Ce résultat réfutait d'avance toutes les tentatives d'unité de la langue de la science telles qu'elles seront formulées par Carnap* en 1932. Popper * remarquait avec ironie que cette réfutation provenait d'un collègue de Carnap au Cercle de Vienne*.

Les théorèmes de Gödel sont d'une grande portée philosophique en contestant la possibilité de formalisation* complète de la connaissance scientifique et s'inscrivent techniquement dans les développements de la logique*, en particulier la théorie des algorithmes*, de la calculabilité* et de la récursivité*, participant ainsi au développement de l'informatique*. Gödel a forcé les mathématiciens à s'interroger sur la différence entre la vérité* et la preuve*, ce qui a provoqué une révolution en mathématiques aussi dramatique que la découverte des géométries non euclidiennes.

En d'autres termes, les penseurs rationalistes après Platon et Descartes voyaient les mathématiques comme l'exemple suprême du raisonnement* et essayaient de s'en inspirer pour des questions relevant d'autres domaines. Pour les tenants de cette vision rationaliste, le théorème de Gödel fut perçu comme un choc car il coupait l'herbe sous le pied aux défenseurs de la raison pure. Si les fondations des mathématiques pures devenaient elles-mêmes incertaines, alors qu'en serait-il d'autres domaines de la réalité, moins ordonnés et plus compliqués mais plus significatifs encore pour nous ? Le but était d'amener la certitude mathématique dans d'autres champs de la pensée humaine, mais si les mathématiques venaient à produire des doutes, de quoi serions-nous sûrs désormais ? Ce sont en partie les raisons du choc.

Dans la seconde moitié du XX^e siècle Chaitin a transposé le résultat de Gödel à la théorie de la complexité*. Si l'on adopte la définition de la complexité de Kolmogorov d'un objet comme taille minimale d'un programme calculant cet objet, les nombres aléatoires* sont ceux pour lesquels il n'existe pas de programme plus court que la liste de leurs chiffres. Chaitin a démontré que bien que la plupart des

nombres soient des nombres aléatoires, un système formel donné, aussi puissant soit il ne peut démontrer le caractère aléatoire que d'un nombre fini de nombres.

GOLDSTONE (THEOREME DE)

GRADIENT

Le gradient est la généralisation de la notion de dérivée aux fonctions à plusieurs (en général 3) variables.

Le gradient d'une quantité quelconque répartie dans un espace (une fonction de trois variables) est le vecteur* caractérisant la variation de cette quantité dans la direction où elle varie le plus (rapidement). Les composantes de ce vecteur sont les trois dérivées* partielles de la fonction, qui expriment sa vitesse de variation selon la direction des trois coordonnées*.

Maxwell voulait appeler cette quantité la pente (slope). Le gradient d'un potentiel* est une force*, c'est là la source de son emploi si général en physique.

C'est un vecteur, que Hamilton* puis Maxwell* expriment d'une façon symbolique comme opérateur*, à l'instar de la variation Δ d'une fonction, en utilisant le delta retourné vers le bas et nommé « nabla ». Il y'a là une évocation d'un ancien instrument de musique assyrien, la harpe. Le succès de cette notation a été si grand que Maxwell lui a consacré une ode en huit parties. Rien d'étonnant si l'on songe que ce qui prenait plusieurs pages s'écrit en quelques lignes avec cette notation. En utilisant ce langage les équations de Maxwell* de l'électromagnétisme* se présentent sous une forme compacte particulièrement élégante. Bel exemple de la fertilité des notations en mathématiques*.

GRAMMAIRE FORMELLE

Système de règles décrivant un ensemble de suites finies de symboles. Ces suites finies s'appellent des propositions et l'ensemble lui même est une langue décrite par la grammaire. La grammaire formelle est une forme de calcul* et définit une syntaxe*. On distingue deux types de grammaires formelles, les grammaires génératives*, système de règles permettant de construire les propositions d'une langue, et les grammaires de reconnaissance, algorithmes permettant de reconnaître si une suite quelconque est une proposition. Distinction un peu conventionnelle il est vrai.

Des grammaires formelles sous tendent l'arithmétique* ou la logique mathématique*, les langages de programmation* ou un

langage de création de formes comme le langage de Lindenmayer*. Les grammaires formelles s'emploient en général pour la description des langues naturelles et artificielles en linguistique mathématique*.

La notion de grammaire formelle a été développée par les linguistes américains Noam Chomsky* et Zelig Harris dans le milieu du XX^e siècle.

GRAMMAIRE GENERATIVE

Système de règles permettant de construire des suites finies de symboles. Le concept de grammaire générative utilisé en linguistique mathématique*, est un cas particulier du concept de calcul*, un des moyens de donner effectivement un ensemble, utilisé en logique mathématique*. Ce terme désigne une classe bien définie de calculs* et l'on parle aussi de grammaires de Chomsky*. La classe des langues engendrées par ces grammaires coïncide avec la classe des ensembles récursivement énumérables*. Les grammaires génératives sont essentiellement utilisées pour la création de langues artificielles et dans la traduction automatique.

GRAMMAIRE TRANSFORMATIONNELLE

Système de règles permettant de construire les propositions d'une langue naturelle à partir d'un petit nombre de propositions simples à l'aide de transformations spécifiques. Cas particulier de grammaire générative*.

GRANDE UNIFICATION

Cf. Unification des forces.

GRAPHERS (THEORIE DES)

GRAVITATION

La gravitation, ou interaction gravitationnelle, est une interaction universelle entre toutes les formes de matière. Sa forme la plus connue depuis longtemps est l'attraction exercée par le globe terrestre sur tout corps matériel provoquant sa chute. Lorsque cette interaction est faible et que les corps se meuvent lentement (par

rapport à la vitesse de la lumière) la gravitation s'exerce selon la loi de la gravitation de Newton*.

Selon cette loi, formulée en 1687 par Newton, dans les « Principia » toutes les particules matérielles de masse m_A et m_B s'attirent entre elles selon une force F dirigée selon la droite qui les joint et proportionnelle au produit des masses* et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. L'expression de la force introduit un coefficient constant G , dit constante gravitationnelle, mesuré pour la première fois en 1798 par Cavendish. Le fait marquant de la loi de Newton est qu'elle fasse intervenir les mêmes masses que celles qui apparaissent dans la loi fondamentale de la dynamique reliant la force à l'accélération, ce qui fait dire que la masse gravitationnelle est égale à la masse inerte. Inertie et gravitation sont de même nature.

Dans le cas général la gravitation est décrite par la théorie de la relativité générale* d'Einstein (1915-1916) comme une action de la matière sur les propriétés de l'espace-temps, propriétés qui influent sur le mouvement des corps et sur d'autres processus physiques..

La théorie de la gravitation se démarque nettement des théories des autres interactions – électromagnétique, faible et forte, en ne se soumettant pas jusqu'à maintenant à une théorie unifiée des interactions (Unification des forces*).

En présence d'une distribution de matière la force gravitationnelle sur une particule de masse m en un point s'exprime comme le produit de m par le vecteur g , qui représente la valeur en ce point d'un champ*, le champ de gravitation, champ des accélérations provoquées par la gravitation dans l'espace environnant la distribution de matière. Ainsi en un point de l'espace l'accélération provoquée par la gravitation, la pesanteur dit on dans le cas de la terre, ne dépend pas de la masse des corps. Aussi des corps de masses différentes lâchés (dans le vide) au même point atteindront le sol au même moment. C'est là un des faits majeurs de la gravitation, découvert par Galilée*. Contrairement à ce que pensait Aristote les objets lourds et les objets légers tombent de la même manière. Fait qui peut paraître paradoxal mais qui exprime fortement la nature de la gravitation comme attraction par une masse matérielle, le globe terrestre en l'occurrence, avec équivalence de la masse inerte et de la masse gravitationnelle. Remarquons tout de suite que les forces gravitationnelles et les forces d'inertie ont en commun cette propriété de l'indépendance de l'accélération de la masse

On introduit traditionnellement une expérience de pensée d'un ascenseur au repos dont le câble serait soudainement rompu.. Il

chuterait vers le sol avec l'accélération typique en ce point et tous les objets qui reposent sur son sol en feraient de même, qu'ils soient lourds ou légers. Tombant tous ensemble avec l'ascenseur les corps n'exerceront plus de poids sur le sol de l'ascenseur et ne sentiront pas le mouvement de chute général. En l'absence de repère extérieur à la cabine des observateurs ne pourraient remarquer l'état de chute accélérée. Si sur le sol de l'ascenseur se trouve une balance portant deux objets différents dans ses plateaux, le fléau reviendra à zéro pendant la chute. Localement dans l'ascenseur tout se passe comme si la gravitation était supprimée, par l'accélération de la cabine. C'est ce que l'on observe dans un satellite artificiel de la terre où la gravitation est totalement compensée par les forces d'inertie, et où un cosmonaute se sent en état d'apesanteur.. Mais toujours en l'absence de repère extérieur un observateur dans l'ascenseur ne peut décider si l'ascenseur est en chute libre ou si l'on a supprimé la gravitation. On ne peut dans l'ascenseur distinguer entre accélération et pesanteur. Voilà le résultat de l'égalité entre masse inerte et masse gravitationnelle. C'est ce que l'on appelle le principe d'équivalence. Il a clairement un caractère fortement local.

Le principe d'équivalence est le point de départ de la réflexion qui conduira Einstein à une nouvelle théorie de la gravitation, la relativité générale*, où le champ de gravitation se manifestera par la courbure* de l'espace-temps.

GRAVITATION QUANTIQUE

GRAVITON

GROSSIERISATION (Coarse graining)

GROUPE

Notion essentielle de l'algèbre*, un ensemble muni de la structure algébrique* la plus simple. C'est la généralisation de la structure la plus couramment rencontrée en mathématiques pour des opérations algébriques binaires comme l'addition des nombres, la multiplication des nombres, l'addition des vecteurs, la succession de transformations.....

C'est un ensemble d'objets abstraits pour lesquels on a défini une loi de composition interne* (c.a.d. une addition ou une multiplication associant à deux éléments un troisième élément de l'ensemble) partout définie et possédant trois propriétés caractéristiques : l'associativité (la composition d'un objet avec la

composition de deux autres est égale à la composition de la composition des deux premiers objets avec le dernier), l'existence d'un élément neutre (l'équivalent du zéro ou du un) et l'existence d'un symétrique pour tout élément (la composition de deux éléments symétriques donne l'élément neutre).

La notion de groupe s'est dégagée essentiellement lors de la restructuration de l'algèbre entre le XIX^e et le XX^e siècle. Sa source principale est dans le problème de la résolution des équations algébriques en termes de racines, en particulier lors des travaux d'Evariste Galois. Mais la géométrie a collaboré à l'émergence de cette notion lorsque Félix Klein a formulé le problème de la classification des géométries à l'aide du concept de groupes de transformations (programme d'Erlangen*).

GROUPE DE LIE

GROUPE DE SYMETRIE

GROUPES (THEORIE DES)

La théorie des groupes étudie tous les types de groupes discrets ou continus qui se présentent en mathématiques ou en physique.

Une des branches les plus fertiles est la théorie des représentations des groupes abstraits dans les espaces vectoriels au moyen d'opérateurs linéaires préservant la structure du groupe. On appelle en effet représentation d'un groupe dans un espace vectoriel la donnée d'un opérateur linéaire correspondant à chaque élément du groupe et tel que l'opérateur correspondant à la composition de deux éléments du groupe soit égal au produit des opérateurs linéaires correspondant à chaque élément. Les représentations d'un groupe abstrait fournissent un modèle linéaire du groupe à l'aide d'opérateurs linéaires concrets ou de matrices*.

La représentation d'un groupe dans un espace vectoriel est dite réductible s'il existe un sous espace non trivial invariant sous l'effet de tous les opérateurs de la représentation. En termes matriciels ceci signifie qu'on peut trouver une base dans laquelle la représentation du groupe soit donnée par des matrices bloc diagonales. Dans le cas contraire on dit que la représentation est irréductible. L'ensemble des représentations irréductibles d'un groupe est une caractérisation très importante de celui ci.

HADRONS

Particules élémentaires participant aux interactions fortes*. Les hadrons participent aux quatre interactions fondamentales ;ales.

Le proton*, le neutron*, les hyperons*, les mésons* et toutes les résonances* sont des hadrons.

Le monde des hadrons est extrêmement riche : on a ainsi découvert les hyperons* delta (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-), les sigma (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-), les ksi (Ξ^0 , Ξ^-) et le lambda Λ^0 , mais également les mésons* pi (π^+ , π^0 , π^-), les mésons K (K^+ , K^0 , K^- , K^0), le méson eta η^0 . La recherche peut sembler désespérée tant la Nature est plus compliquée qu'on ne l'avait pensée.

HAMILTONIEN (FONCTION DE HAMILTON)

Fonction des variables d'état du système, variables canoniques, coordonnées et impulsions généralisées*, égale à la somme de l'énergie cinétique* et de l'énergie potentielle*. C'est en fait l'énergie* du système. Elle est constante si l'hamiltonien ne dépend pas du temps.

L'hamiltonien peut être obtenu à partir du lagrangien* par la transformation de Legendre*.

HAMILTONIEN (Opérateur)

Opérateur de la mécanique quantique correspondant à l'observable* énergie*. Il est obtenu par une procédure de quantification* à partir de la fonction hamiltonienne du système classique qui sert de modèle de référence au système quantique. Il intervient dans l'équation de Schrödinger.

HAMILTONIEN (SYSTEME)

Système dynamique correspondant à des systèmes d'équations différentielles faisant intervenir d'une manière croisée (symétrique) la dérivation par rapport aux variables canoniques de la fonction de Hamilton*. Le système hamiltonien est défini par ces équations dites de Hamilton qui apparaissent pour la première fois en mécanique classique.

De très nombreux systèmes physiques mécaniques ou électromagnétiques admettent comme modèle un système hamiltonien. Ce sont des systèmes conservatifs* sans frottement*.

L'intérêt des systèmes hamiltoniens comme systèmes dynamiques vient de la structure géométrique de leur espace de phase qui présente une structure symplectique*.

HARMONIE

Du grec *harmonia*, union, assortiment, c'est la situation où se trouvent plusieurs éléments réunis qui s'accordent. C'est la doctrine des accords et l'idéal de la coexistence des parties. Concept suffisamment vague pour supporter selon les domaines et selon les époques des définitions variées.

En musique* l'accord est la réunion coordonnée de plusieurs sons entendus simultanément. La constitution des accords, leur enchaînement, la place qu'ils occupent et le rôle qu'ils remplissent dans le discours musical constituent l'*Harmonie*.

En 1722, le *Traité de l'harmonie* de Rameau ouvre aux regards des musiciens des horizons nouveaux, en même temps qu'il attire sur la théorie musicale l'attention d'une portion du monde savant. Rameau y pose les prémisses d'un système qu'il développera en d'autres écrits et que dès l'abord il déclare fondé sur « les principes naturels », c'est-à-dire sur les données acoustiques fournies par le partage de la corde vibrante, les rapports des sons et l'existence des sons harmoniques, toutes matières que les travaux encore récents du physicien Sauveur avaient proposées à l'étude des « philosophes ». Tous les degrés de la gamme diatonique étant reconstruits par le rapprochement des sons fournis par la résonance du corps sonore, Rameau met en fait que « la mélodie naît de l'harmonie »; pour adapter sa théorie à des buts pratiques, il établit une classification des accords, considérés en eux-mêmes et d'après leur relation avec ceux qui les précèdent ou les suivent, desquels ils dépendent ou qu'ils commandent, par anticipation, supposition, suspension, prolongation ; il entreprend enfin d'établir entre eux un lien rationnel et fixe, par l'artifice de la basse fondamentale, devenu par la suite à ses yeux comme à ceux de ses commentateurs, la clef de voûte de sa doctrine.

Il est naturel de donner le qualificatif d'harmoniques aux sons qui accompagnent toujours un son donné selon la décomposition de Fourier* et d'étendre cette dénomination aux composantes de Fourier d'une fonction périodique.

La notion d'harmonie en général est liée à la notion d'esthétique des proportions*. Tout au long des siècles, avec des appellations variées, on trouvera réaffirmé l'idéal d'une esthétique des proportions mais sans véritable formulation quantitative, à fortiori mathématique.

Les grecs, pour nommer la beauté, utilisaient des termes qui désignaient la disposition, l'arrangement ou l'ordre des parties : *symmetria* pour la beauté visible, *harmonia* , consonance, pour la

beauté audible, ou taxis pour l'ordre. L'harmonie désignait l'organisation de l'univers, du cosmos, par opposition au chaos. Chez les pythagoriciens l'harmonie découle de leur conception du nombre comme synthèse du limité et de l'illimité. Le cosmos se trouve selon eux constitué par une série de sphères concentriques autour de la terre, dont les distances entre elles correspondent aux relations numériques de l'octave musicale (Harmonie des sphères*). Pour Héraclite* l'harmonie est dans l'unité des contraires. Platon dans le « *Timée* » développe les idées pythagoriciennes. Aristote* envisage l'harmonie comme l'unité et l'accomplissement du tout, comme l'unité dans la diversité

C'est sans doute chez Plotin que l'on trouve cette esthétique clairement formulée (Du Beau. Ennéades) : La beauté réside dans « l'accord et la proportion des parties entre elles et avec le tout ».

Mais à part les fractions simples des harmonies musicales, et l'emploi de fractions comme $5/8$, $1/8$, ou $1/3$, on ne trouve pas de chiffres précis des proportions esthétiques.

Platon lui même s'est borné à des affirmations générales : « C'est toujours beau et vertueux de conserver la mesure et les proportions » (Philèbe 64E), « Le laid signifie simplement l'absence de mesure » (Sophiste 228A).

Au 1^{er} siècle avant J.C. Vitruve avait déjà exprimé cela dans le domaine de l'architecture. Nous le donnons dans le texte français du XVI^{ème} siècle ré orthographié :

« La composition des temples consiste en symétrie, de laquelle tous Architectes doivent diligemment entendre le secret. Cette symétrie est engendrée de proportion que les Grecs nomment Analogie.

Proportion est un certain rapport et convenance des membres ou particularités à toute la masse d'un bâtiment et de cela vient à se parfaire la conduite d'icelles symétries.

Or n'y a - t -il ni Temple ni autre édifice qui puisse avoir grace de bonne structure sans symétrie et proportion, et si la convenance n'est gardée en toutes ses parties aussi bien qu'en un corps humain parfaitement formé. »

De la composition des
maisons sacrées, ensemble des
symétries du corps humain.

Chapitre I

Le grand Alberti (1404-1472), artiste et savant, déclare que : « *la beauté est un accord ou une certaine conspiration, s'il faut parler ainsi, des parties en la totalité, ayant son nombre, sa finition et sa place, selon que requiert la suscite correspondance, absolu certes et principal fondement de nature* ». Après ces belles paroles, Alberti mathématicien, déclare croire en une profonde unité de la nature au nom de laquelle il adopte une correspondance entre les intervalles musicaux et les proportions en architecture.

« car (certes) ainsi va la chose, considéré que les nombres causans [qui sont la cause] que la concordance des voix se rende agréable aux oreilles, ceulx la sans autres [ceux là seuls] font aussi que les yeulx et l'entendement se remplissent de volupté merveilleuse ».

Et de là vient tout le système des proportions en usage à la Renaissance. Un système de rapports arithmétiques simples, pour des gens qui assimilent encore note musicale et longueur de cordes. Les architectes de la Renaissance cherchent à construire une musique visible. Les proportions musicales exprimant comme une structure interne universelle on cherche à les transposer dans le domaine cosmologique (musique des sphères célestes), anthropométrique (harmonie du corps humain), alchimique et ésotérique, et bien sur architectural. Nous voilà renvoyés à Platon et à Pythagore. Pour Leibniz* confronté au problème de l'interaction entre l'âme et le corps il y'a en fait entre eux une *Harmonie préétablie**, une harmonie si parfaite que chacune d'elles, tout en ne faisant que se développer selon les lois qui lui sont propres, éprouve des modifications qui correspondent exactement aux modifications éprouvées par l'autre. Leibniz affirme que toutes ses « *monades* » correspondent entre elles selon une diposition divine.

Kant* transporte la source de l'harmonie dans le sujet humain en tant qu'accord entre la raison et la perception. Pour Hegel* c'est une correspondance entre des différences qualitatives, prises dans leur ensemble et découlant de l'essence même des choses.

L'harmonie des couleurs* développe une problématique spécifique. On distingue sur le cercle chromatique les couleurs voisines qui présentent une harmonie des analogies et les couleurs opposées proches des complémentaires* qui présentent une harmonie des contrastes. De tous temps l'association du rouge ou du rose avec le vert a paru belle. Leonard de Vinci a vanté l'association du jaune et du

violet et Newton* celle du bleu et de l'orangé. Harmonies des contrastes.

HARMONIE PREETABLIE

Système imaginé par Leibnitz pour lever la difficulté qu'offre, en métaphysique*, l'action de l'âme sur le corps et du corps sur l'âme. Leibnitz suppose que le corps et l'âme n'agissent pas réellement l'un sur l'autre, mais qu'il existe entre ces deux substances, accouplées par le Créateur, une harmonie* si parfaite, que chacune d'elles, tout en ne faisant que se développer selon les lois qui lui sont propres, éprouve des modifications qui correspondent exactement aux modifications éprouvées par l'autre, bien qu'obéissant chacune à un mécanisme particulier. Deux horloges parfaitement réglées qui marqueraient toujours la même heure.

HASARD

Lorsque les conditions minimales de production ou d'apparition d'un phénomène sont réalisées à plusieurs reprises indépendamment et que le phénomène ne se reproduit pas identique ou presque identique à lui même, on voit là une situation où se manifeste le hasard. Le hasard semble donc traduire l'existence d'une causalité faible, puisqu'à des causes voisines semblent correspondre des effets très différents. Dans ces circonstances les effets semblent imprévisibles, et cette imprévisibilité est prise souvent comme la marque même du hasard. Le hasard ne serait il alors que la marque de notre ignorance* des causes complètes et précises ou la caractéristique de phénomènes objectifs indépendants de notre connaissance ? Une conception subjective ou objective du hasard. Dire que le hasard est une illusion due à notre ignorance ou que ce sont des circonstances qui donnent à notre ignorance un rôle particulier. Le hasard nous met en situation d'ignorance, mais ce n'est pas l'ignorance qui crée le hasard, même si l'on peut plaquer du hasard sur l'ignorance. Le hasard est –il dans nos têtes ou dans la nature ?

Dans la formulation mathématique des phénomènes de hasard la notion d'indépendance* joue un rôle fondamental. L'indépendance* est une notion probabiliste qualifiant de manière intuitive des événements aléatoires* n'ayant aucune influence l'un sur l'autre. C'est l'opposé de la corrélation*. Il s'agit d'une notion très importante en statistique et calcul de probabilités. Les évènements aléatoires qui

manifestent le hasard sont indépendants les uns des autres. Ainsi un premier lancer de dés n'a aucune influence sur la valeur d'un second lancer. On a même pu dire que le calcul des probabilités* est une théorie mathématique (la théorie de la mesure) dont l'interprétation probabiliste n'apparaît que si l'on définit la notion d'indépendance.

L'indépendance ou non de deux événements n'est pas toujours facile à établir ce qui signifie qu'affirmer qu'un phénomène relève du hasard est souvent difficile.

Si l'idée de hasard opposée à celle de nécessité*, tout comme l'idée de libre arbitre* opposée à celle de prédestination, apparaît dès la plus haute antiquité (Aristote considérait un hasard rare et un hasard fréquent et ne retenait que le premier alors que l'époque moderne en biologie, allusion à Monod*, érige le hasard fréquent au rang de cause fondamentale, autrement dit abdication de l'intelligence (ce qui n'est au contraire pas le cas de la physique et des systèmes dynamiques*) et hante la plupart des doctrines religieuses et des systèmes philosophiques (avec tout de même assez généralement une distinction entre la contingence* et la providence*), une conception précise de la nature du phénomène ne se dégage que vers la fin du XIX^e siècle. L'idée vient alors à J.C. Maxwell*, H. Boussinesq, H. Poincaré* de lier l'apparition du hasard à l'existence d'instabilités particulières des systèmes dynamiques*.

Le hasard n'apparaît plus alors comme la manifestation d'une causalité faible ou défaillante, mais comme le résultat d'une disproportion entre les variations des causes et les variations des effets.

« Il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les dernières. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit » H. Poincaré.

On peut remarquer que le poème de Stéphane Mallarmé, « Un coup de dés jamais n'abolira le hasard » a été publié à la même époque que les études de Poincaré. L'air du temps ?

La voie était ouverte pour la découverte d'une catégorie particulière de hasard, le hasard déterministe ou « chaos déterministe* », le hasard du non hasard. Coup de tonnerre scientifique et philosophique, puisque le déterminisme peut engendrer des comportements ayant tous les caractères du hasard.

Le XX^e siècle a beaucoup contribué à faire passer le concept de hasard de la métaphysique à la science.

Loin de constituer un constat d'ignorance, le hasard s'avère une des sources les plus riches de la connaissance de la complexité du

monde. C'est là sans doute une des révolutions conceptuelles les plus marquantes du XX^{ème} siècle, inaugurée par le célèbre mémoire d'Einstein en 1905, sur le mouvement brownien, ouvrant la voie à la liaison entre atomisme et hasard.

La manifestation du hasard sous forme de fluctuations* de grandeurs physiques n'est pas nécessairement une marque d'absence de causes ou d'indéterminisme*, mais plus souvent l'indice d'une structure physique discontinue sous jacente.

On n'insistera jamais assez sur le caractère novateur et fécond de l'emploi par Einstein des fluctuations* comme révélateurs de « structures ». Structure atomique de la matière, puis dans un deuxième temps structure granulaire de la lumière (photons*) associée aux fluctuations dans le rayonnement du corps noir*.

Einstein érige en fait un principe fondamental de la physique (et même de la philosophie naturelle) : sous les fluctuations, des discontinuités (de structure) dans les « conditions » (le milieu) qui accompagnent le phénomène.

Ainsi le bruit* de fond électrique traduit la structure granulaire de l'électricité (l'électron) et les fluctuations des courants électriques de l'influx nerveux révèlent la structure des membranes cellulaires (canaux permettant le passage des ions).

Quant à l'omniprésence du hasard en microphysique elle est manifestement liée au concept de la discontinuité des quanta*, « porteurs » de la propriété fondamentale de dualisme* onde-corpuscule.

Que le hasard soit le symptôme d'une réalité physique cachée plaide à soi seul pour l'objectivité du hasard, malgré toutes les difficultés que l'on éprouve pour définir le hasard avec précision.

Un second fait majeur renforce ce sentiment de l'objectivité du hasard, l'existence de régularités étonnantes que l'on traduit par le concept de probabilité*. Bien que l'interprétation des probabilités* envisage la possibilité d'une interprétation subjective.

Malheureusement, la probabilité, traduction d'une phénoménologie*, ne révèle pas la nature du hasard. De fait si l'on se pose la question de définir et produire une suite de nombres aléatoires*, on ne peut que constater que la théorie du calcul des probabilités (et la statistique*), évitent soigneusement d'y répondre. Ces théories sont de type axiomatique* et souffrent comme d'autres (la mécanique quantique par exemple) de holisme* conceptuel. Une probabilité, c'est ce qui satisfait au calcul des probabilités, ce qui ne permet pas à soi seul de donner un sens réel à cette notion dans le monde physique. La probabilité n'est pas une grandeur physique

comme une autre. Tout comme la mécanique quantique la théorie des probabilités doit être munie d'interprétations*.

La seconde moitié du XX^{ème} siècle a vu se développer une conception objective du hasard selon trois caractérisations, qui malgré certains théorèmes de correspondance, ne sont pas toujours clairement raccordées.

La première, se fonde sur la notion d'information*, introduite par Shannon, et développée dans un cadre probabiliste, ce qui constitue en fait une manière d'interprétation de la probabilité. La théorie de l'information cherche à définir des procédures de codage par élimination des redondances dans des distributions qui ne sont pas véritablement au hasard. Le hasard parfait est le cas limite où l'information est maximale, c.a.d. la surprise totale, en l'absence de toute redondance. Le hasard parfait correspond à une distribution de probabilité uniforme : tous les événements ont la même probabilité. C'est le cas de pile ou face ou du dé.

La seconde, tout en gardant cette idée de la non compressibilité d'une suite aléatoire, renverse en quelque sorte la perspective en s'intéressant à l'algorithme* susceptible de produire une telle suite. « Dis moi d'où tu viens, je te dirais qui tu es ». Développée par Solomonoff, Kolmogorov et Chaitin, cette théorie s'enracine dans la théorie du calcul et la notion de langage universel (ou de machine universelle). Elle définit la complexité algorithmique d'un objet par la « longueur » du plus court programme qui permette à une machine universelle d'engendrer l'objet. Cette définition ne distingue pas, donc confond, la complexité réelle immanente (ontologique) et la complexification liée à la méthode ou à la représentation (épistémique). Une suite est dite aléatoire selon Kolmogorov, si sa « longueur » propre est au moins égale à sa complexité algorithmique. Il n'y a pas de programme engendrant la suite qui soit plus « court » que la suite elle-même. Si ce programme plus court existait il pourrait être considéré comme la véritable « explication » du phénomène décrit par la suite. Une suite aléatoire selon Kolmogorov n'a donc pas d'explication plus courte qu'elle-même. Elle n'est pas prédictible* par principe. Cette approche épistémique du hasard, quoique très fertile au plan mathématique, a un inconvénient majeur, elle ne permet pas de dire si une suite donnée est aléatoire. La propriété est indécidable. La complexité de Kolmogorov est incalculable. En présence d'un programme donné produisant un objet on ne saura jamais si c'est le plus court possible. Par ailleurs si l'on ne connaît pas de programme produisant un objet,

rien ne permet d'affirmer qu'il n'en existe pas. Pour juger de la complexité de Kolmogorov d'une suite donnée, il faut donc tenter d'utiliser des stratégies d'approximation, s'il en existe. On a alors recours à des méthodes de compression de la théorie de l'information, ce qui peut se justifier par le théorème remarquable selon lequel la longueur probable de la plus courte description binaire d'une variable aléatoire est plus ou moins égale à son entropie * de Shannon.

La troisième s'inscrit dans le cadre de l'étude des suites « pseudo-aléatoires* », qui a connu un développement extraordinaire avec la découverte du « chaos déterministe* ». Le pseudo aléatoire* semble différer de l'aléatoire* selon Kolmogorov* car il est engendré par un algorithme relativement court. L'aléatoire du non aléatoire. Mais cela est trompeur car il faut tenir compte de la quantité d'information nécessaire pour définir les conditions initiales avec précision. Les séquences pseudo-aléatoires sont algorithmiquement complexes.. Ce qu'il y a de commun entre une suite aléatoire selon Kolmogorov et une suite pseudo-aléatoire c'est l'absence de forme globale, c.a.d. de non représentation de la suite (non intégrabilité* dans le cas du chaos) par des fonctions simples.

Dans tous les cas (sauf que la non intégrabilité a une forme mathématique où malgré tout il est vrai que l'on connaît les critères nécessaires mais non pas les critères nécessaires et suffisants; c'est pourquoi les mécaniciens célestes font des coupes de Poincaré* car la présence de chaos va en retour prouver la non intégrabilité), c'est un vide de forme mathématique qui empêche de manipuler les données globalement et oblige de recourir à une description statistique au moyen du calcul des probabilités. C'est ce vide de forme que l'on appelle le HASARD et qui s'oppose aux tentatives de prédiction* et de prévision*. Ce vide de forme collective provient de l'indépendance statistique des données entre elles excluant les regroupements.

La question du hasard est exemplaire. Elle souligne la différence entre le caractère ontologique* ou épistémique* d'une démarche scientifique. C'est la mauvaise perception de cette différence qui explique la grande confusion qui règne souvent dans les discours sur le hasard. Les stratégies de caractérisation ontologique du hasard ont jusqu'à présent échoué dans la pratique. Le noumène* hasard reste « insaisissable ». On ne peut prouver l'existence du hasard. Seul le phénomène est accessible.

Derrière la discussion sur l'indéterminisme* en mécanique quantique, se profile essentiellement la question de savoir si le hasard

pur existe en microphysique, ou si l'on voit se manifester un pseudo aléatoire*, que l'on ne sait pas caractériser comme tel. La phénoménologie aléatoire de la physique quantique ne laisse transparaître aucune conclusion sur le hasard ou le déterminisme, d'autant plus que le calcul de probabilité quantique* présente de nombreuses spécificités qui le singularisent.. N'en déplaise aux philosophes imprudents.....D'aucuns pensent que si la mécanique quantique décrit bien une situation physique où le hasard se manifeste, ce hasard microphysique devrait pouvoir être reconnu comme un chaos déterministe* dans une théorie fondamentale sous-jacente une « théorie à variables cachées *». Le grand débat contemporain sur la nature de la mécanique quantique porte sur l'existence ou non d'une telle théorie. Les difficultés conceptuelles et les contradictions auxquelles se heurte l'élaboration d'une telle théorie peuvent laisser penser que la microphysique manifeste peut-être l'existence d'un hasard pur, autre que le chaos déterministe, un hasard indéterministe, lié à un effondrement de la causalité. A moins que tout simplement le hasard ne soit introduit par l'opération de mesure* qui crée les observables*. Le débat, sinon la polémique, reste largement ouvert.

HASARD ET NECESSITE

HEISENBERG (RELATIONS D'INDETERMINATION DE)

Les relations d'indétermination* de Heisenberg* désignent dans la littérature différentes inégalités qui sont diversement interprétées. Elles sont aussi appelées relations d'incertitude*. Elles constituent une expression raccourcie des principes fondamentaux de la M.Q. De ce fait elles sont souvent considérées comme le symbole du caractère spécifique de la microphysique.

Elles ont été trouvées en 1927 par Heisenberg* par des considérations heuristiques où s'alliaient le dualisme onde-corpuscule* et une perturbation du système par l'acte d'observation. La découverte de Heisenberg a joué un rôle historique très important dans l'élaboration conceptuelle de la M.Q..

Dans un consensus minimal ces relations sont des inégalités (inégalités de Robertson*) qui affirment que le produit des dispersions* statistiques de deux observables non compatibles* doit être supérieur à la constante de Planck divisée par deux.

Ces relations précisent le lien qui existe entre les dispersions* statistiques d'observables non-compatibles*. Elles portent un caractère totalement épistémique*. Elles expriment en particulier le fait général de l'absence d'état* quantique pour lequel deux

observables non-compatibles, (dont les opérateurs ne commutent pas) n'auraient à la fois aucune dispersion statistique des résultats de mesure. Ce qui signifie en particulier que si la dispersion s'annule pour une observable (état propre*) elle devient infinie pour toute observable non-compatible. Ainsi la mesure de la position* et de l'impulsion* d'une particule dans un même état ne peut révéler une absence simultanée de dispersion statistique pour ces deux grandeurs observées, et la dispersion statistique pour l'une est d'autant plus élevée que la dispersion statistique pour l'autre est plus petite.

Les inégalités de Robertson* sont au cœur de l'interprétation probabiliste de la M.Q.. Elles concernent le caractère aléatoire des résultats de mesure et affirment la non-indépendance des observables non-compatibles* et rien d'autre. C'est à vouloir leur donner toute autre signification, en particulier de vouloir les interpréter comme une marque d'indéterminisme*, parce qu'elles semblent miner la notion de trajectoire*, que manuels et écrits de vulgarisation fourmillent d'affirmations fantaisistes.

Disons ce que ces inégalités ne sont pas :

- elles ne découlent pas du dualisme-onde corpuscule, mais bien sûr ne le mettent pas en défaut, ce qui serait le cas s'il existait un état quantique d'une particule où position et vitesse seraient à la fois connues avec certitude.
- elles n'affirment pas l'absence de trajectoire de phase, car elles ne concernent de toute façon pas la réalité en l'absence d'observation. Elles ne concernent pas la réalité ontologique* du système individuel.
- elles ne signifient en rien que l'observation perturbe le système, car cela supposerait que l'on sait quelque chose sur le système en l'absence d'observation. Nous savons seulement que l'observation perturbe notre connaissance du système en modifiant l'état*.
- elles expriment une propriété observée du système et n'ont rien à voir avec une quelconque imperfection de la technique expérimentale de mesure.
- elles ne concernent pas l'observation simultanée (observation conjointe*) de deux observables non-compatibles* sur un même système microphysique, mais l'observation parallèle ou successive sur des répliques du même système se trouvant dans le même état .

Aujourd'hui les inégalités de Robertson ne font que condenser les principes de la mécanique quantique et ne jouent pas de rôle

privilegié sauf à pouvoir être utilisées pour des raisonnements heuristiques et qualitatifs concernant les objets quantiques.

On résume souvent la mécanique quantique comme une théorie des atomes et des particules satisfaisant au principe d'incertitude pour les observables et au principe de superposition* des états. Ces deux principes sont en fait ancrés dans la structure mathématique d'algèbre linéaire* de la théorie.

HENOLOGIE

HEREDITE

HERMENEUTIQUE

Art ou théorie de l'interprétation*.

A l'origine l'herméneutique concerne l'interprétation des textes sacrés. On parle aussi d'exégèse.

Le « Guide des égarés » de Maimonide* est un monument de l'herméneutique qui s'applique à donner du texte biblique (Thora) une interprétation figurée ou métaphorique.

La théologie protestante s'appuie sur une herméneutique de l'ancien et du nouveau Testament.

L'interprétation de la Loi est une herméneutique judiciaire.

Au XIX^{ème} siècle la notion d'herméneutique s'élargit et devient une critique générale des textes dont le sens, la valeur et la portée des mots, sont spécifiés en les mettant en relation avec le contexte* culturel et historique. L'herméneutique se distingue souvent peu de la sémiotique*, et en particulier de la pragmatique*, dans la mesure où elles ont toutes deux à faire avec l'univers des significations*.

HERMETISME

L'Hermétisme aurait en fait rassemblé au cours des siècles de l'histoire occidentale, une famille d'esprits avant tout désireux de « travailler » au dépassement de toutes les formes de dualisme* ; il serait caractérisé par un certain type de sensibilité, susceptible par sa plasticité même, d'accueillir des voies de réalisation spirituelle différentes.

Fondamentalement ouvert à la pluralité, l'Hermétisme n'en est pas moins orienté par un constant désir d'unité qui, dans la perspective alchimique*, fut nommé Grand Œuvre, Pierre Philosophale.....

C'est sans doute pour avoir si constamment affirmé son désir d'unité* que l'Hermétisme fut appelé à être une figure du recours, à certaines charnières de l'histoire des idées où philosophies, sciences et religions révélées démontrèrent leur impuissance à réorienter l'homme vers une espérance de salut qui ne passât pas par quelque Eglise constituée ou système de connaissances reconnu.

HESYCHASME

D'un mot grec signifiant la tranquillité.

Tradition de pratique spirituelle, constituant le fondement de l'ascétisme dans la religion orthodoxe, et comportant un large complexe de représentations sur l'homme, sa conscience et sa activité.

Phénomène complexe avec une longue tradition historique.

HIGGS (Cf. BOSON DE HIGGS*)

HIGGS (Cf. CHAMP DE HIGGS*)

HISTOIRE

Tout objet a une histoire, soit une description de son état* au cours du temps. En relativité, cette histoire s'exprime par une ligne d'univers*. A un instant donné seul le passé constitue l'histoire, mais le système en garde plus ou moins la mémoire*.

HISTOIRE DE LA PHILOSOPHIE

Dans toute sa complexité et sa diversité, l'histoire de la philosophie est l'histoire de la récurrence d'un certain nombre de grands thèmes. Des invariants qui résistent à toutes les transformations.

La philosophie grecque est à l'origine de bien de ces interrogations essentielles. Elle manifeste cette liberté dans la vision du monde* qui caractérise la philosophie. Elle s'avère déjà une conception abstraite* de l'existence et de son évolution. Avec une tendance constante à vouloir sortir des cadres ordinaires par une considération de l'infini dans la métaphysique*.

HISTOIRE DES SCIENCES

HISTONES

Protéines associées à l'ADN* pour former un nucleosome*. L'ADN y est enroulé autour d'un octamère d'histones.

HOLISME

Position philosophique et scientifique sur le rapport entre le Tout et les Parties* privilégiant le Tout. C'est une philosophie de la totalité s'appuyant sur la maxime d'Aristote* dans la « Métaphysique » « Le Tout est plus grand que la somme des Parties* »

Hegel* disait que seul le tout a un sens. Cette idée s'oppose au mécanisme* et au réductionnisme*.

Le néo-mécanisme* et l'étude des phénomènes non-linéaires* donne au holisme une grande actualité.

HOLISME SEMANTIQUE

Point de vue selon lequel le sens d'un élément du discours appartient au discours lui-même et ne peut pas être considéré isolément.

HOLOGRAPHIE

HOMEOMORPHISME

Un homéomorphisme, ou application homéomorphe, est un des concepts fondamentaux de la topologie*. Deux espaces topologiques sont dits homéomorphes s'il existe une application continue univoque de l'un sur l'autre, l'application inverse étant continue. Cette application est appelée homéomorphisme. Ainsi les cercles et les carrés sont homéomorphes. Les propriétés des figures qui ne changent pas par passage à des figures homéomorphes sont appelées propriétés topologiques. La connexité et la compacité sont de telles propriétés.

HOMEOPATHIE

L'image de l'homéopathie est celle d'une médecine « douce », « naturelle », « traditionnelle ». Elle est perçue comme l'héritière de la sagesse ancestrale et de l'empirisme inspiré de générations d'herboristes, se transmettant au fil des temps les vertus bienfaisantes des plantes de nos campagnes.

L'homéopathie participe d'un paysage idéologique où figurent en bonne place l'alchimie* et l'astrologie*, et où cherchent à se placer des savoirs sur des actions que la physique ne connaît pas. Il faut dire que sur ce point la physique est laxiste et qu'elle laisse se développer des discours où la matérialité des actions cède le pas à des effets de concepts immatériels, derrière lesquels se profilent les notions de potentiel*, de puissance*, de probabilité* ou d'information*. L'univers de la matière et de l'énergie est battu en brèche par l'univers de l'information*. Le succès du discours homéopathique doit être perçu dans ce cadre où la physique elle-même sème la confusion.

L'homéopathie est issue de l'imagination de Friedrich Hahnemann, né en Saxe en 1755. Il étudie la médecine, mais en abandonne la pratique en 1789, déçu par les résultats qu'il obtient. La médecine de l'époque n'offre que purgations, clystères et saignées. Lui, et c'est tout à son honneur, veut guérir les malades. L'homéopathie, née en 1786, n'est pas vraiment fille de la Naturphilosophie car elle est moins théorique qu'empirique, mais elle n'en poursuit pas moins certains objectifs communs et s'attache comme elle aux relations entre micro- et macrocosme*.

La règle de base de l'homéopathie : « Similia similibus curantur », les semblables sont guéris par les semblables. Ce qui signifie que tout produit capable de provoquer sur un sujet sain les symptômes d'une maladie est capable de la guérir. Après expérimentation de multiples drogues et poisons sur lui-même et ses disciples, il publie, en 1819, « L'organon de l'art de guérir », qui deviendra la Bible des homéopathes. On peut admettre la bonne foi d'Hahnemann, face aux connaissances de son temps. Mais aujourd'hui, les progrès accomplis dans la connaissance des maladies font table rase du principe de similitude. Une maladie se guérit en agissant sur ses causes et non sur ses effets. De plus, aucun médicament réellement actif n'a jamais vérifié le principe de similitude. Imagine-t-on par exemple un antibiotique reproduire sur un homme sain les symptômes de la maladie qu'il guérit ? Quant à l'amalgame fait de ce principe avec celui de la vaccination ou de la désensibilisation, il est sans fondement. Ces méthodes ont pour but de permettre à l'organisme de développer ses propres défenses face à l'agent pathogène, ce qu'il ne saurait faire face à un produit qui provoque seulement les mêmes symptômes.

Afin d'éviter les ennuis provoqués par l'ingestion de produits souvent dangereux utilisés sous forme brute, Hahnemann procède à leur dilution. Ce principe, né de la nécessité, sera justifié et théorisé après coup. En fait l'homéopathie utilise un principe de dilution tel

qu'il ne reste en général aucune molécule dans la solution. Alléguer que la connaissance de la matière n'est pas achevée n'est que mauvaise foi et incompetence. Les physiciens ont en effet, depuis longtemps, franchi la barrière de la molécule et de l'atome, pour répertorier les particules élémentaires, et ils voguent aujourd'hui gaiement dans l'antimatière. Pourtant, ni l'un ni l'autre de ces domaines ne peut intervenir au niveau d'une banale réaction biochimique. En résumé, le médicament homéopathique ne contient « rien ». On a pu invoquer alors une prétendue « mémoire de l'eau ». Mais sans parler même du fait que des expériences sérieuses n'ont pas révélé l'existence de cette mémoire, l'agitation thermique détruit en un instant dans le milieu aqueux toute trace de « forme » qu'y aurait laissé un produit depuis lors éliminé.

Hahnemann a perçu d'ailleurs les objections que pouvaient entraîner de pareilles dilutions. C'est pourquoi il indiqua qu'à chaque opération le flacon devait être secoué une fois d'abord, puis deux fois à la seconde dilution et ainsi de suite...Donc, pour pallier l'absence (admise) de matière active, au cours de la dilution, à chaque étape, on secoue vigoureusement le mélange et c'est cette dynamisation qui imprime dans le solvant une trace, une information, qui se transmet tout au long des dilutions. Le granule serait un médicament « informationnel ». On vient là frôler des conceptions tout à fait suspectes, mais qu'un certain air du temps favorise avec complaisance.

Le seul crédit que l'on peut faire à l'homéopathie c'est de s'intéresser non pas tant à la maladie qu'au malade, ce qui signifie qu'elle accorde une grande importance au rôle du terrain personnel. Le médicament homéopathique est d'ailleurs un placebo particulièrement actif. La médecine moderne ne peut qu'applaudir à cette démarche, elle qui s'en est longtemps privée.

Le succès public de l'homéopathie, surtout en France, participe de cette confusion des esprits, que laisse subsister le manque d'information véritable sur les discours et les démarches de la science contemporaine.

HOMME

HOMOLOGIE

HOMOLOGIE ET ANALOGIE EN BIOLOGIE

HOMONYMIE

HOMOTHETIE**HORLOGE****HORLOGE MOLECULAIRE (Cf. Rythmes biologiques*)****HUBBLE (CONSTANTE DE)****HUYGENS (PRINCIPE DE)**

Méthode permettant de définir le front d'une onde à tout instant. Selon ce principe, tous les points d'un front d'onde à un instant donné doivent être considérés comme des sources d'ondes sphériques secondaires, et le front d'onde à un instant postérieur est l'enveloppe de ces ondes secondaires. Ce principe permet d'expliquer les lois de réflexion et de réfraction de la lumière. Il a été proposé par Huygens* en 1690.

HUYGENS-FRESNEL (PRINCIPE DE)

Fresnel a complété le principe de Huygens en introduisant l'hypothèse de la cohérence et de l'interférence des ondes secondaires. Il définit ainsi une méthode approchée de résolution du problème de la propagation d'une onde. Selon ce principe, l'onde atteignant tout point extérieur à une surface fermée contenant une source (de lumière ou de son) peut être considérée comme le résultat de l'interférence d'ondes secondaires élémentaires émises par tous les points de la surface fermée. Ce principe permet de résoudre les problèmes les plus simples de diffraction*. Il a été proposé en 1818 par A. Fresnel* comme généralisation et extension du principe de Huygens.

HYLEMORPHISME**HYPOSTASE (Cf. REIFICATION*)**

Terme de la philosophie antique, introduit par Poseidonios (135-51/50 av. J.C.), un stoïcien, pour signifier l'unité de l'existence réelle, à la différence de l'existence apparente ou de l'existence en pensée. Le "Comme çà" dans son opposition au "Comme si".

Par évolution historique, le terme en est venu à signifier le processus de réification* regardant comme une entité réelle

indépendante, un concept ou une abstraction jouant un rôle explicite dans une théorie ou une explication.

L'hypostase tente de faire passer un "Comme si" pour un "Comme ça". Elle essaye de fonder la croyance en l'existence d'une substance* sous-jacente à différents groupes d'attributs* perceptibles.

C'est la démarche adoptée aujourd'hui dans nos considérations sur les particules élémentaires. Leur existence est acceptée du seul fait de leur rôle dans des théories physiques fortement explicatives. L'hypostase transforme ainsi " l'instrumentalisme*" en "réalisme*".

L'hypostase est utilisée aussi pour donner statut d'objet à des entités qui jouent un rôle dans des théories mais ne donnent pas lieu à un accès expérimental direct. C'est le cas du Vide quantique* ou des particules virtuelles*.

On a pu prétendre que toute chose n'est acceptée comme existante qu'en vertu d'une hypostase. La seule alternative à l'hypostase serait l'observation directe. Mais l'on sait bien que toute observation* ne peut être faite qu'en se fondant sur une théorie. Ce qui laisse de beaux jours à l'hypostase.... en prenant garde de ne pas créer des mythes.

Pour désigner l'objet créé par une hypostase, on peut employer le joli mot de "faitiche" (B. Latour).

HYPOTHESE

HYSTERISIS

L'hystérisis, d'un mot grec qui signifie retard, est la propriété d'un système de ne pas répondre instantanément à l'action d'une force. La réaction du système dépend des forces qui ont agi auparavant, c.a.d. que le système dépend de sa propre histoire. Les grandeurs physiques caractérisant l'état ne dépendent pas d'une façon univoque des grandeurs physiques caractéristiques des conditions extérieures. L'état* à un moment donné ne dépend pas seulement des conditions extérieures à cet instant mais de celles d'instantants précédents. L'hystérisis est une manifestation propre aux systèmes héréditaires* et traduit des phénomènes de relaxation*

L'hystérisis des substances ferromagnétiques*, comme le fer, le cobalt ou le nickel et leurs alliages, est la dépendance du champ magnétique dans l'échantillon non seulement du champ appliqué extérieur mais de toute l'histoire antérieure de l'échantillon. Cette hystérisis magnétique s'explique par l'existence de petits domaines d'aimants permanents qui se repositionnent selon des processus plus ou moins entravés.

L'hystéresis se manifeste dans des matériaux élastiques qui sous l'effet de grandes pressions peuvent conserver une déformation et la relâcher en exerçant un effet de pression inverse. Un effet qui s'explique par une anisotropie des caractéristiques mécaniques et le frottement interne à l'intérieur des corps solides.

ICONOCLASTE (QUERELLE)

Crise religieuse et politique qui bouleversa l'empire byzantin de 726 à 843. Elle opposa les "iconoclastes" partisans de la suppression du culte des images aux "iconodules", partisans de ce culte, qui sortirent vainqueurs de cette lutte. Dans la quête du "Comme ça" le "Comme si" s'impose comme une étape obligée.

ICONE

L'icône* est un signe* où il y a similitude topologique entre le signifiant* et le signifié* ou le référent*. C'est une représentation* imagée d'une chose. Le signifiant y représente quelque chose en vertu d'une qualité propre partagée avec le référent.

ICONICITE

IDEALISATION

L'idéalisation est une forme d'approximation* d'un système, où l'on produit un nouveau système physique différant non pas tant numériquement que qualitativement de l'original. Un modèle* est en général une idéalisation. Une abstraction* constitue une idéalisation.

La caractérisation des idéalisation est assez souple. Une idéalisation peut être un autre système réel, ou un système fictif, ou une partie du système ou un objet mathématique.

La mécanique hamiltonienne*, obtenue en négligeant le frottement*, est bien sûr une approximation, mais c'est surtout une idéalisation car elle change la nature qualitative du mouvement qui voit disparaître la possibilité de cycles limites* et d'attracteurs*

L'approximation semi-classique, où la matière est traitée de manière quantique et la lumière de manière classique, est une idéalisation car elle exclut les phénomènes de l'optique quantique*, en particulier les phénomènes de fluctuation*.

Le modèle planétaire de l'atome de Bohr* est non pas une approximation mais une idéalisation, pour autant que dans l'atome de la mécanique quantique les orbites planétaires n'existent pas.

IDEALISME

Position philosophique considérant l'esprit ou la conscience comme la réalité fondamentale. Doctrine essentiellement anti-réaliste* et anti-matérialiste affirmant l'absence d'objets réels en dehors de notre esprit, ou plus simplement l'impossibilité de connaître de tels objets.

On parle en général d'idéalisme subjectif qui conteste l'idée que des objets réels soient la source de nos perceptions. L'idéalisme subjectif se présente sous deux formes .

Sous la forme empirique représentée par Berkeley*, Hume* et Mach*, cette doctrine soutient que les objets sont des faisceaux d'impressions stables, que la perception est passive et se borne à enregistrer des impressions.

Sous sa forme rationaliste représentée par Kant* et ses disciples, une chose perçue (Ding für uns) est une construction de notre esprit suscitée par une chose objective (Ding an sich) qui existe dans le monde mais qui n'est pas connaissable. L'agnosticisme* kantien est un réalisme ontologique (existence objective du monde) mais un idéalisme épistémologique (subjectivité de la connaissance). Il s'oppose non pas au réalisme* mais au réalisme scientifique*. Mais chez les néo-kantiens* comme Cassirer*, on va jusqu'à rejeter la chose en soi.

IDEALISME ALLEMAND

IDEAUX DE LA SCIENCE

Les idéaux de la science diffèrent de bien des façons des idées qui y sont mises en pratique. Il font connaître de quelle manière une communauté scientifique imagine ce que la science devrait être si jamais elle était menée à son achèvement et expriment ainsi les critères ultimes de la rationalité de leur temps. Platon* et Galilée* étaient porteurs d'un idéal de mathématisation de la nature.

C'est ainsi qu'au nom d'un idéal mécaniste de la nature, le XVII^e siècle a ressenti de la gêne vis-à-vis de sa théorie scientifique la plus féconde, la loi de la gravitation universelle, lors même qu'il l'acceptait. Newton en personne était persuadé que la gravitation n'était pas une qualité occulte*, bien qu'elle parût agir à distance, et espérait qu'elle recevrait un jour une explication mécanique.

Einstein, de son côté, au nom d'un idéal de description complète du réel, un réel indépendant de son observateur, contestait que la mécanique quantique soit une théorie ultime du réel, malgré ses succès impressionnants.

Tout le XX^e siècle a vécu un idéal d'axiomatisation des théories, porté par les développements de la logique et des mathématiques axiomatisées (Cf. Axiomatique en physique*). Malgré les contre coups du théorème de Gödel* et de l'échec de l'enseignement des mathématiques modernes (Cf. Bourbakisme*), des tentatives d'axiomatisation de la mécanique quantique se font jour (Cf. Axiomatique quantique*), tout en laissant la M.Q. et la théorie quantique des champs un immense bricolage. Au mieux voit on la théorie des groupes jouer un rôle dans ce chantier.

Tous les scientifiques rêvent d'une représentation du temps* qui passe et rongent leur frein avec le temps actuel en physique théorique, qui tout en acquérant un certain statut physique, ne coule désespérément pas.

IDEE (ιδεα, ειδος)

Dans la théorie platonicienne des Idées, le monde des choses n'est qu'un reflet* d'un monde idéal, celui des Idées.

Une Idée est ce qui est toujours identique à soi même, ce qui est l'unité d'une multiplicité et ce qui est pris comme modèle pour faire une chose ou pour accomplir une action. Idea ou eidos sont deux termes que l'on traduit par idée, mais qui ne se recouvrent pas nécessairement. Le premier manifeste surtout une métaphore démocratéenne* qui permet la traduction par « *forme* », alors que le second indique le sens plus logique de particularité ou spécificité de la chose qui rend possible la traduction par « *espèce* ».

Platon distingue ce qu'est une chose, l'essence (ousia) de l'aspect sous lequel elle se donne dans l'ordre de l'abstraction comme forme ou comme espèce.

IDEES DE LA PHYSIQUE

Dans son développement historique depuis le XVI^e siècle la physique et la science ont promu un certain nombre de grandes idées forces qui forment un cadre pour la Philosophie naturelle.

L'essor de la science occidentale est lié à la formulation de l'héliocentrisme, qui en combinant les lois du ciel et de la terre, crée les conditions d'une vision mécanique du monde. Copernic*, Kepler* et Galilée* instaurent le mécanicisme*. Une des idées maitresse de cette

démarche concerne le mouvement* qui est reconnu comme constituant une propriété des corps, même en l'absence des causes : l'arc ayant cessé d'agir la flèche continue à voler. Mais ce mouvement est relatif par rapport aux repères : la vitesse totale est la somme de la vitesse de la source et de la vitesse propre. Si vous marchez sur un tapis roulant votre vitesse propre s'ajoute à celle du tapis. C'est la Relativité galiléenne*. Elle exprime que les lois de la mécanique (sans gravitation) apparaissent absolument identiques dans tous les repères définis comme inertiels*, pourvu que les vitesses relatives des uns par rapport aux autres soient constantes.

Descartes* introduit une idée qui fera fureur jusqu'à aujourd'hui.

A la géométrisation de l'espace des grecs, il ajoute une physicalisation de l'espace. En identifiant la matière et l'étendue* il donne à l'espace une réalité physique. Idée qui sera reprise par celle du champ* pour exprimer l'interaction de proche en proche, idée qui imprègne la théorie quantique des champs* et des particules élémentaires*. Idée qui s'accomplit dans le concept de vide quantique*. Mais ne pouvant croire au vide, car il considère l'espace comme une substance, il doit caractériser la substance qui emplit le vide. Une matière subtile constituée d'une manière dualiste par une substance continue et une substance corpusculaire. Le dualisme onde-corpuscule* de la physique quantique ne se trouvera pas dans une plus vaste galère que Descartes.

Par delà toutes ces idées s'impose une idée force qui fera le succès de la science européenne. La nature est descriptible en langage mathématique. On ne soulignera jamais assez à quel point cette idée commune à Galilée, Descartes et Newton est décisive dans la vision du monde que propose la physique. Cette rationalité mathématique est à la base du programme scientifique* de Descartes. . C'est un idéal d'intelligibilité*. On a peine aujourd'hui à imaginer une autre voie, comme le propose la phénoménologie transcendantale* de Husserl*.

Cette mathématisation de la physique s'accompagne de développements propres aux mathématiques. Ainsi Newton et son rival Leibnitz* développent l'analyse infinitésimale*, introduisant les notions de dérivée* et d'intégrale* d'une fonction*. Sa création marque une ère nouvelle dans l'histoire des mathématiques. Elle pénètre dans l'ensemble des disciplines mathématiques. Les nouveaux chapitres de la physique vont s'accompagner de nouveaux chapitres des mathématiques. Mécanique analytique* et calcul des variations*, théorie des ondes* et équations aux dérivées partielles*, la théorie de la propagation de la chaleur et l'analyse de Fourier*, la relativité

générale* et la théorie des tenseurs*, la mécanique quantique* et l'analyse fonctionnelle*, les problèmes de spectre continu* et la théorie des distributions*, les lois de conservation* et la théorie des groupes*, la théorie des systèmes dynamiques*, la mécanique classique*, l'électromagnétisme, la théorie des champs de jauge* et la géométrie différentielle*, les probabilités* et la théorie de la mesure*.

Au mathématicien Pierre Fermat revient l'idée de comparer l'évolution réelle d'un système avec les évolution voisines imaginables, et d'accorder à celle-ci un privilège d'optimalité selon un critère bien défini. Le principe de Fermat* en optique selon lequel dans les phénomènes de réflexion et de réfraction le rayon de lumière se propage selon le chemin optique minimum, ce qui minimise le temps de parcours. Dans les mains de Maupertuis, Leibnitz*, Euler*, Lagrange* et Hamilton* cette idée va prendre une expression mathématique pour la mécanique.

Cet emploi de principes variationnels* est une des idées les plus profonde de la physique. Elle formule mathématiquement des idées de la théologie ou de la philosophie, sur l'harmonie préétablie* et le meilleur des mondes possibles. Presque toutes les théories physiques admettent une version concurrente ou alternative sous forme variationnelle. En 1918 Emmy Noether* donnera un sens physique à ces principes variationnels en les liant au problème des invariants de différents groupes de transformation. C'est là donner à ces principes un sens géométrique (Cf. Géométrie et physique*) (Cf. Structures algébriques de la physique*) (Conservation* –principes de).

Dans un monde où tout change, l'idée que certains objets ou certaines grandeurs physiques se conservent, est une idée décisive. Elle a en fait une longue histoire depuis les fameuses idées de Platon. Mais elle culmine avec la loi de conservation de l'énergie* en thermodynamique*. La première loi de la thermodynamique stipule que la quantité de chaleur échangée par le système correspond à la variation de l'énergie interne et au travail effectué contre les forces extérieures par le système. Cette loi a été formulée au XIX^e siècle par R. Mayer, J. Joule, et H. Helmholtz*. Les transformations de la chaleur s'accompagnent d'une conservation de l'énergie qu'elle transporte. Tout processus se déroulant dans la nature peut être considéré comme la transformation d'une forme d'énergie en une autre. Témoin la transformation réciproque entre énergie cinétique* et énergie potentielle*. La physique se trouve obligée de réintroduire la potentia* aristotélicienne qu'elle avait voulu chasser. Max Planck* s'en inspirera lorsqu'il formulera la loi d'échange de l'énergie entre la

lumière et la matière, aux fondements mêmes de la théorie quantique*. $E=h\nu$ traduit emblématiquement la conservation de l'énergie.

Dans ce paysage idyllique surgit un obstacle à la libre circulation de l'énergie. De la chaleur ne peut pas être intégralement transformée en travail. C'est le principe de Carnot à la base du second principe de la thermodynamique*. Il n'est pas possible d'imaginer un processus dont le seul résultat serait de produire du travail équivalent à toute la chaleur fournie par une source thermique. Il n'est pas possible d'envisager un processus qui transférerait de l'énergie d'une source plus froide vers une source plus chaude. Des faits qui vont irradié toute la physique et mener à la définition de la notion d'irréversibilité* et d'une nouvelle grandeur physique l'entropie*. Energie et entropie sont les piliers de la physique. On voit s'introduire ainsi pour la première fois l'idée que les processus se déroulent avec contraintes. Bien sur Aristote avait déjà invoqué de tels contraintes (le frottement*) pour empêcher le mouvement d'aller à l'infini. Ces contraintes vont s'avérer essentielles pour la constitution du monde. C'est grâce à elles que l'ordre* peut surgir du chaos*(Cf. Auto-organisation*). Il n'y a pas de formes* sans contraintes.

Avec le second principe de la thermodynamique s'ouvre une nouvelle vision du monde*. Au kosmos infiniment ordonné des grecs succède un monde fait de limitations. Il n'y a pas de mouvement perpétuel. On ne peut pas remonter le temps. On ne peut s'affranchir du frottement*.....On ne peut pas aller plus vite que la lumière. Matière et lumière ne peuvent pas échanger de l'énergie librement. Deux électrons ne peuvent pas se trouver dans le même état, ce qui assure la stabilité de la matière. Les formes* correspondent à une brisure de symétrie. La brisure spontanée de symétrie* au cœur des interactions fondamentales. Un monde qui incorpore le désordre* dans sa constitution même.

Pour la formulation de l'électromagnétisme en un langage éliminant l'action à distance* on introduit dans la nature un objet nouveau, le champ*. Ce n'est pas de la matière mais un être élué constitué de possibilités d'action distribuées dans l'espace. Un être géométrique aux aspects multiformes. Voilà bientôt deux siècles que la physique cherche à donner une consistance à ce nouveau venu envahissant. Après l'avoir revêtu d'un improbable éther* elle l'a affublé de mythes quanta*. Au prix d'échafaudages mathématiques elle a fini par le peupler de particules virtuelles* et de l'appeler le champ du vide*. Dans la physique contemporaine il n'y a pas d'objet plus complexe que le vide, en particulier parce que c'est un nom de code pour tout ce que nous ne savons pas. Une partie de l'univers est là

cachée, immense réservoir de particules élémentaires*. Dans la boîte à outils du physicien le champ devient aussi nécessaire que les particules et l'on utilise le champ...à tout bout de champ.

Les propriétés du champ électromagnétique sont à l'origine d'une profonde modification de notre conception de l'espace et du temps. Pour rendre compte de la constance de la vitesse de la lumière dans tous les repères inertiels*, Einstein* à recours à l'invariance des équations de Maxwell* du champ électromagnétique dans une transformation de Lorentz*, ce qui crée une liaison entre l'espace et le temps. L'espace-temps* est né. L'espace-temps est invariant dans tous les référentiels.

A ces interrogations sur la nature physique de l'espace-temps et du champ va venir s'ajouter le mystère d'une onde qui accompagnerait toute particule*, l'onde de de Broglie*. Elle est à l'origine de la mécanique quantique* qui bouleverse notre vision du monde, tout en ne répondant pas à nos questions sur l'univers sub-quantique*. Eternelle frustration quant à la nature ultime et profonde de la nature.

Une grande idée est pourtant là partout présente. Les échanges d'énergie entre champs* et matière* n'ont pas lieu de manière continue, mais par quanta*. Les quanta des champs sont des particules élémentaires*, ce qui contribue à faire basculer la notion de matière au profit de la notion de champ*

La seconde moitié du XXème siècle est marquée par un renouveau total d'intérêt des physiciens pour les problèmes du comportement complexe des systèmes déterministes* classiques. En particulier la possibilité pour ces systèmes de manifester un comportement « chaotique » totalement non distinguable de celui qui serait du au « hasard* », provoque un afflux considérable de travaux sur les systèmes non-linéaires* et les conditions de l'apparition de la turbulence*. La nature du hasard en physique classique et la raison de ses lois semblent à la portée d'une justification rationnelle. Le débat fondamental sur les rapports entre la mécanique classique* et la mécanique statistique*, inauguré par Boltzmann*, se trouve réactualisé. Le développement indépendant mais simultané de la thermodynamique des phénomènes irréversibles*, de la théorie des transitions de phase* et de la théorie des phénomènes coopératifs (laser*, superconductivité*) inaugure l'étude des systèmes ouverts* et des phénomènes d'autoorganisation* dont ils sont le siège. Tout un ensemble de catégories dichotomiques classiques réapparaît sous un jour nouveau où les oppositions cèdent la place à des relations de passage. Simple et complexe, ordre* et désordre*, déterminisme* et

hasard*, conservatif et dissipatif, linéaire* et non-linéaire* sont les grands thèmes que la théorie des systèmes dynamiques* permet d'éclairer et de relier. Une Science Nouvelle apparaît, un néo-mécanisme*, que d'aucun ont cherché à nommer synergétique*. Tout ceci non pas sans débats philosophiques et sans disputes idéologiques.

Ce renouveau de la physique classique s'inscrit dans un mouvement plus vaste que l'on peut caractériser comme une « géométrisation de la physique* ». La théorie de la relativité générale* d'Einstein* et les travaux de mécanique céleste* de Poincaré* sont à l'origine de ce mouvement. En simplifiant à l'extrême on peut dire qu'il y'a là un rapport nouveau entre la physique et les mathématiques. D'une conception locale qui s'exprime à travers l'analyse mathématique* la physique évolue vers des conceptions globales qui se décrivent mieux en terme de géométrie* et de topologie*. Le rôle croissant de la théorie des groupes* dans la physique contemporaine n'est qu'une première étape dans cette évolution. La physique change d'esprit, persuadée que la réponse aux problèmes fondamentaux viendra de la géométrie. Résurgence de la maxime platonicienne « Nul n'entre ici s'il n'est géomètre ». C'est en ce sens en tout cas que se comprennent tous les programmes* de théories unitaires*, et que du microphysique au macrophysique, voire au cosmologique même, s'installe une nouvelle vision de la réalité. (Cf. Géométrie et physique*, Géométrie et réalité*).

Toute l'histoire de la physique tient en l'élaboration d'un certain nombre de concepts clés. Le mouvement*, la matière*, l'inertie*, la force*, l'énergie*, le champ*. Quelques grande doctrines mettent ces concepts en œuvre. L'atomisme*, la mécanique classique*, la thermodynamique classique*, l'électromagnétisme *, la relativité*, les quanta*. De nouveaux concepts prennent corps et façonneront sans doute la physique du XXIème siècle. L'action*, l'entropie*, l'information*.

L'ère des calculateurs et des supercalculateurs inaugure-t-elle une physique sans idées ? Une physique de la simulation des systèmes complexes à l'instar de l'emploi des automates cellulaires*. Une physique du traitement statistique d'une infinité de données. Certes la pratique de la science est modifiée, mais les règles du jeu restent les mêmes. Comprendre c'est comprimer, observer suppose toujours un modèle*, et à ce jeu là les performances de l'esprit dépassent souvent celles de la machine. Celle-ci n'écrase pas le joueur d'échecs.

IDENTITE

IDEOLOGIE

Le concept d'idéologie comporte une connotation péjorative. Car l'idéologie n'est ni une doctrine philosophique, ni une théorie scientifique. C'est une pensée partisane.

Pour Marx* c'est un *système plus ou moins cohérent d'images, d'idées, de principes éthiques, de représentations globales, et aussi de gestes collectifs, de rituels religieux, de structures de parenté, de techniques de survie (et de développement), d'expressions que nous appelons maintenant artistiques, de discours mythiques ou philosophiques, d'organisation des pouvoirs, d' institutions et des énoncés et des forces que celles-ci mettent en jeu, système ayant pour fin de régler au sein d'une collectivité, d'un peuple, d'une nation, d'un état, les relations que les individus entretiennent avec les leurs, avec les étrangers, avec la nature, les espoirs, la vie et la mort.*

L'idéologie c'est une vision du monde et de la vie. C'est un système d'orientation, notamment politique, dans une société complexe. Une idéologie est un ensemble apparemment autonome d'idées toutes faites.

L'idéologie peut traduire les intérêts d'une classe sociale ou d'un groupe socioprofessionnel, et servir à masquer les entreprises de domination. Il existe une lutte idéologique. L'idéologie est une pensée militante, dont la forme est rationnelle et le contenu ne l'est pas.

Malgré les affirmations contraires la distinction sera souvent difficile entre les formes de pensée idéologiques et les formes de pensée scientifiques. On peut même dire que distinguer la science de l'idéologie est une idéologie. L'idéologie se présente en général sous couvert de la science, mais la science s'avance souvent couverte d'idéologie, au point de paraître une véritable idéologie, le scientisme*.

A sa naissance, la science moderne, et tout particulièrement la physique, se pose comme une idéologie. Idéologie audacieuse, qui affirme la descriptibilité (mathématique) du monde terrestre et l'intelligibilité de l'espace profane. Affirmation idéologique inouïe : le discours humain accède aux vérités de la nature. En un sens, l'homme ou plus exactement la physique mathématique parle le langage de Dieu*.

Cet aspect idéologique majeur de la physique, répond sans doute, comme toute idéologie, a des besoins pressants d'orientation de l'activité sociale et économique. Si révolution scientifique il y'a eu, ce

sont les ingénieurs, les navigateurs et les cartographes de la Renaissance qui en sont les acteurs. C'est l'activité économique de l'Europe depuis le XII^{ème} siècle qui est en dernier ressort responsable de la naissance d'une idéologie qui sous-tend l'activité industrielle et marchande. La science est une idéologie de la conquête, de la domination du monde par la bourgeoisie conquérante. D'où son assurance, son impudence même.

La bonne physique se fait à priori. Voilà au fond l'idéologie révolutionnaire de Galilée. L'idéologie de ses successeurs Newton ou Einstein. Ce sera la démarche d'un platonicien avéré comme Heisenberg*, tout comme celle de Schrödinger* ou de Dirac*. La relativité et la mécanique quantique vont porter au sommet cette pratique magique de la physique théorique liée à la manipulation quasi-somnambulique des principes mathématiques et des équations. Et par miracle, que seule la foi en la toute puissance (« divine ») du langage mathématique justifie, naissent des théories qui décrivent le monde. Justice est de dire qu'elles ne l'expliquent guère. Mais cette démarche réussit encore dans les théories du champ de jauge pour l'unification des interactions fondamentales.

La physique classique* est l'expression d'une idéologie de l'individualisme inscrite au cœur d'un atomisme* universel. L'identité des objets physiques n'y fait point de doute ; la possibilité d'isoler, de séparer, de fragmenter, s'exerce souverainement. Le système physique isolé, la trajectoire de la particule, la matière isolée dans l'espace vide, le rayon lumineux, les atomes, les particules élémentaires, les évènements isolables du calcul des probabilités participent tous de l'idéologie de l'individualité physique. Les rapports de l'objet physique à l'environnement sont conçus comme de perturbations qui n'affectent pas le cœur dur identitaire de l'objet primitif. La physique moderne s'instaure dans un coup de force, la formulation d'une dynamique dont le frottement* est exclu, et qui ne s'applique en vérité qu'au mouvement des astres.

La mécanique quantique marque à la fois l'apogée et le déclin de cet atomisme universel. Car nous voilà en plein baroque de l'atomisme de par la multiplication des êtres élémentaires à laquelle se prête la quantification* : particules*, antiparticules*, particules virtuelles*, quasi-particules*. L'idéologie est si forte qu'elle peuple de particules le vide* et l'inconnu. Et cela au moment même où la reconnaissance de la corrélation quantique* bouleverse la notion intrinsèque de propriété individuelle des objets microphysiques. Crise d'identité de la particule où le système complexe* mène à la fin d'un certain réductionnisme* :

les particules ont les propriétés du système bien plus que le système n'a les propriétés des particules.

Des idéologies concourent à la constitution de la physique, mais la physique qui se constitue reçoit un accueil plus ou moins favorable de la part du milieu social selon les idéologies en vigueur. Ainsi l'accueil fait à la mécanique quantique a beaucoup dépendu de l'idéologie des savants ou des milieux intellectuels.

Dans l'atmosphère de conflit idéologique ouvert que connut l'après-seconde guerre mondiale et que l'on a désigné par l'euphémisme de « guerre froide », mettre en doute la perfection de la mécanique quantique et la pertinence de l'interprétation de Copenhague* de son formalisme était le fait des savants marxistes* ou communistes. Dans son opposition à cette interprétation Louis de Broglie* était entouré d'une équipe dont tous les membres étaient des communistes militants. La littérature scientifique soviétique fourmille alors de critiques vis-à-vis de la théorie quantique de la mesure* (présence de l'observateur*) et d'espérances envers une théorie fondée sur des variables cachées*. Réductionnisme* contre antiréductionnisme.

Ce rôle de l'idéologie dans l'acceptation d'une théorie s'est pleinement manifesté au cours du débat des années 80 sur le chaos déterministe* et l'origine du hasard*. Débat idéologique sur le déterminisme et la liberté. Débat polémique où l'on voit René Thom* s'opposer à Ilya Prigogine* en s'insurgeant contre la méconnaissance de l'apport décisif des mathématiciens dans la théorie des systèmes dynamiques*, et contre la subversion éventuelle de ces résultats par les physiciens. Dans l'esprit quantique de Bohr* et Rosenfeld*, Prigogine affirme que pour les systèmes instable la notion de trajectoire devient une inobservable, et cela au sens fort. Il s'agit d'une démonstration d'impossibilité analogue à celles rencontrées à la base de la relativité* et de la mécanique quantique. Une difficulté au plan épistémique* transformée en une impossibilité ontologique* : les trajectoires n'existent pas.. Dans le chaos déterministe les trajectoires existent bel et bien, mais la sensibilité aux conditions initiales rend leur calcul délicat.

IGNORANCE

IMAGE

Il y a une grande diversité d'emploi du mot image, comme objet second par rapport à un autre. Un « Comme si* » correspondant à un « Comme ça* ». Une présence dans l'absence.

Il faut distinguer l'image mentale de l'image matérialisée, comme le fait l'anglais, par l'usage des mots *image* et *picture*.

L'image est une représentation*, mais elle doit satisfaire à certains critères de ressemblance ou d'analogie*. Dieu créa l'homme à son image, mais l'homme n'est pas une représentation de Dieu. Pour Platon le monde est une image du monde des idées sans pour autant les représenter. L'impression de ressemblance entre l'image et le réel est une construction mentale, tout comme un modèle*. C'est une déformation de la réalité, qui joue un rôle médiateur dans la connaissance de celle-ci. L'image n'est pas une pure réplique du monde (mimésis*), mais elle se fabrique et se décrypte selon certaines règles.

On distingue les images visuelles et les images verbales inséparables de la fonction de production de métaphores* du langage humain.

Toute image pour exister pleinement pour la conscience doit de ne pas se confondre avec la chose même, au point qu'une représentation n'est jamais davantage image qu'en l'absence de la chose représentée. L'imagination* est d'ailleurs la représentation en l'absence de la chose. Le vide de l'icône permet d'éviter l'idolâtrie. L'image n'est pas la chose même sinon elle ne serait pas une représentation mais sa présence.

Comme le dit Bergson* l'image est « *Une certaine existence qui est plus que ce que l'idéaliste appelle une représentation, mais moins que ce que le réaliste appelle une chose- une existence située à mi chemin entre la chose et la représentation* »

L'image constitue une catégorie mixte et déconcertante qui se situe à mi chemin du concret et de l'abstrait, du réel et du pensé, du sensible et de l'intelligible. Image visuelle, image abstraite, image verbale, elle est une représentation médiatrice qui collabore aussi bien à la connaissance du réel qu'à sa dissolution dans l'irréel. A la différence du symbole* et de la métaphore* l'image occupe dans l'espace-temps une position semblable à l'objet, ne fusse que par une similitude de forme*.

La culture du début du XX^e siècle a été marquée par une crise des images et de la figuration qui s'est manifestée avec force dans l'apparition de l'art abstrait* et dans le développement de la

mécanique quantique*. Cette disparition de l'image a suscité et suscite encore bien des résistances au point que la mécanique quantique garde un parfum d'ambiguïté, témoin de sa constitution par un usage métaphorique massif des images mécaniques classiques, tout en reconnaissant que l'objet quantique n'a pas de représentation dans l'intuition sensible. Ce qui n'empêche pas la permanence d'un discours qui oppose l'image ondulatoire à l'image corpusculaire, ou jongle allègrement avec la notion d'orbite à défaut de pouvoir parler de trajectoire. La mécanique quantique *marque* le passage d'une physique des images à une physique des symboles préparée depuis la fin du XIX^e siècle par les idées des physiciens allemands comme Helmholtz* ou Hertz*.

Cette crise de l'image (et du sens*) débute sous le signe de la logique mathématique* et s'étend sur tout le siècle sous couvert des divers structuralismes* : cybernétique*, théorie de l'information*, linguistique structurale* et sémiotique*. Pour déboucher sur une société de la communication* pour la communication. L'art répercute cet aspect dominant de la culture par une crise incessante de la figuration.

IMAGE (ANTHROPOLOGIE)

Les images sont créées par l'homme et le corps humain est souvent impliqué dans ce processus.

L'anthropologie des images distingue selon Philippe Descola (*La fabrique des images*) différentes visions du monde associées :

« un monde animé » : l'animisme, c'est-à-dire la généralisation aux non humains d'une intériorité de type humain. Toute entité - un animal, une plante, un artefact - est dotée d'une intériorité, animée d'intentions propres, capable d'action et de jugement. Par contre, l'apparence physique change d'une entité à l'autre. Le modèle animiste rend visible l'intériorité des différentes sortes d'existant et montre que celle-ci se loge dans des corps aux apparences dissemblables.

« un monde objectif » : le naturalisme*. La formule du naturalisme est inverse de celle de l'animisme : ce n'est pas par leur corps, mais par leur esprit, que les humains se différencient des non-humains, comme c'est aussi par leur esprit qu'ils se différencient entre eux. Quant aux corps, ils sont tous soumis aux mêmes décrets de la nature et ne permettent pas de se singulariser par des genres de vie, comme c'était le cas dans l'animisme. Cette vision du monde, qui domine en Occident depuis des siècles, doit donc figurer deux traits

:l'intériorité distinctive de chaque humain, la continuité physique des êtres et des choses dans un espace homogène

« un monde subdivisé » : le totémisme. Le monde du totémisme, composé d'un grand nombre de classes d'êtres regroupant des humains et diverses sortes de non-humains, les membres de chaque classe partageant des ensembles différents de qualités physiques et morales que le totem est réputé incarner. . Les images totémiques révèlent l'identité profonde des humains et des non-humains de la classe totémique : identité interne (ils incorporent une même « essence » dont la source est localisée et dont le nom synthétise les propriétés qu'ils possèdent en commun) et identité physique (ils sont formés des mêmes substances, sont organisés selon une même structure et possèdent le même genre de tempérament et de dispositions).

« un monde enchevêtré » : l'analogisme Le modèle iconologique de l'analogisme est un modèle inverse du précédent. Avoir sur le monde un point de vue analogiste signifie percevoir tous ses occupants comme différents les uns des autres. Ainsi, au lieu de fusionner en une même classe des entités partageant les mêmes substances, ce système distingue toutes les composantes du monde et les différencie en des éléments singuliers. Un tel monde, dans lequel chaque entité forme un spécimen unique, deviendrait impossible à habiter et à penser si l'on ne s'efforçait de trouver des correspondances stables entre ses composantes humaines et non humaines, comme entre les parties dont elles sont faites. Par exemple, selon les qualités qu'on leur impute, certaines choses seront associées au chaud et d'autres au froid, au jour ou à la nuit, au sec ou à l'humide. La pensée analogiste a donc pour objectif de rendre présents des réseaux de correspondance entre les éléments discontinus, ce qui suppose de multiplier les composantes de l'image et de mettre en évidence leurs relations. Quelle que soit l'exactitude de la représentation des détails à laquelle la figuration analogique peut parvenir, elle ne vise pas tant à imiter avec vraisemblance un prototype « naturel » objectivement donné, qu'à restituer la trame des affinités au sein de laquelle ce prototype prend un sens.

Mais il existe des mirages de ressemblances : les faux-amis. Ce sont des images ayant des propriétés formelles similaires, mais dont les conventions figuratives répondent à des principes tout à fait différents. Une approche purement formelle des images ne permet pas de mettre en évidence les différentes visions du monde qu'elles expriment. Citons comme exemple :

la peinture de paysage : une peinture de paysage hollandaise (l'imitation de la nature propre au naturalisme) et une peinture de paysage chinois (une réplique du cosmos propre à l'analogisme)

la figuration humaine : l'homme inscrit dans le cercle du cosmos divin (selon l'analogisme médiéval) et l'homme inscrit dans le cercle de sa propre mesure (selon le naturalisme de la Renaissance)

le portrait : un buste d'ancêtre figuré de façon réaliste (propre à la connectivité analogiste) et un portrait sculpté (propre à la peinture de l'âme naturaliste)

les masques à forme d'oiseaux : un masque peut figurer une intériorité de type humain dans un corps animal (propre à l'animisme) et un masque du carnaval sud américain proprement naturaliste.

Les démarches de la science* sont éminemment productrices d'images et c'est l'étude anthropologique de ces images qui fournit une bonne part de l'anthropologie de la science. L'implication du corps est patente dans la construction des images et c'est sans doute une des raisons qui fait bannir l'image dans les religions monothéistes. La querelle de l'iconoclasme* byzantin au VIII^e siècle, et le triomphe des iconodules sur les iconoclastes est un évènement majeur dans le développement de la culture occidentale.

La production des images liées à l'activité de connaissance de la nature suit les mêmes modalités générales. L'image animiste transparait dans « l'esprit des atomes », l'analogie* règne en maître, témoin Maxwell construisant sa théorie de l'électromagnétisme avec des analogies hydrodynamiques, le naturalisme* est omniprésent et constitue la base même de la science, quant au totémisme il affleure dans la classification des phénomènes* et des théories* par catégories.

IMAGE NUMERIQUE

IMAGE PHYSIQUE DU MONDE (Cf. Idées de la physique*)

Représentation* du monde et de ses phénomènes, chargée d'idéologie*, et construite à partir de la physique* sur la base des observations expérimentales et des échafaudages théoriques. Cette image* (Weltbild, selon le terme allemand consacré) varie avec les développements de la science et au gré des grands programmes* scientifiques: image atomiste (Démocrite) et continualiste (Aristote), images mécaniste* et dynamique (Newton*, énergétisme*, systèmes dynamiques*), images électromagnétique et relativiste (Maxwell*,

Lorentz*, Einstein*), image quantique (Mécanique Quantique*, Théorie Quantique des Champs*), image aléatoire* (Hasard*), image cybernétique*. Ces images mettent successivement au premier plan: l'atome*, l'espace*, le mouvement*, la force*, l'énergie*, le lien entre le temps et l'espace, le lien entre les forces et la matière, le champ*, le caractère statistique des lois de la nature et le dualisme onde-corpuscule*, l'information*. En fait deux grandes images se partagent notre vision du monde, la classique* et la quantique*.

Une des grandes caractéristiques de l'image du monde dans la science contemporaine est une conception globale d'évolutionnisme. La notion d'évolution* introduite par Darwin* en biologie s'est infiltrée dans les autres sciences en particulier en astronomie* et en cosmologie* dans les conceptions sur l'expansion de l'univers* et l'origine de l'univers*. D'autres conceptions font usage de l'évolutionnisme, comme la géologie avec la dérive des continents. L'esprit de l'évolutionnisme infiltre toutes les doctrines contemporaines sur l'organisation*, l'auto-organisation*, la complexification et la naissance des formes*. L'évolutionnisme est partie intégrante de la physique non linéaire et le hasard* s'avère nécessaire à l'évolution.

La portée de cette évolution de l'image du monde depuis les années 80 est considérable. Elle remplace la description de systèmes fermés sur lesquels agissent des forces extérieures, la vision du monde régnante de l'antiquité au mécanisme* de Newton*, par une considération de systèmes ouverts dont la non linéarité* autorise une organisation intérieure, l'auto-organisation*, sélection naturelle de formes*.

La constitution d'une image physique du monde remplit une fonction d'explication* et d'interprétation*.

L'image physique du monde a progressivement perdu son caractère concret et visuel, en remplaçant les différences qualitatives par des différences quantitatives. L'image physique du monde contemporaine comporte des systèmes d'équations non-observables directement et dont la signification est délicate à saisir. Ainsi en est-il de l'image du monde du "Modèle Standard" qui considère le monde comme construit avec des quarks* et des leptons* dont les interactions sont décrites par des champs de jauge* avec leurs quanta*-particules.

Cette image n'est plus une "image*", mais une représentation abstraite. S'il faut en croire Max Planck*, ce serait là un signe d'une approche plus profonde de la réalité. Mais d'aucuns espèrent voir restaurer une physique qualitative (Cf. Théorie des Catastrophes*).

Remarquons aussi qu'à toute représentation de l'univers en correspond nécessairement une autre de la société. C'est cette correspondance qu'exploite le constructivisme social*.

IMAGERIE RMN (Imagerie par résonance magnétique nucléaire)

IMAGINAIRE et IMAGINATION

L'imaginaire se positionne à première vue, comme la fiction* ou le virtuel*, face au réel* et à la rationalité*. Mais loin de constituer une catégorie secondaire de la pensée, c'est au contraire un concept central de la psyché, entre perception* et intellect.

L'imaginaire est l'ensemble des représentations*, imagées ou linguistiques, qui apparaissent lors de notre saisie du réel. L'imaginaire n'est ni la perception* ni l'intelligence*, mais une activité psychique au centre de ces fonctions cognitives. L'imaginaire est la fabrique du symbolique* et du métaphorique* qui permettent la connaissance*. L'imaginaire est la source du sens figuré qui précède souvent le sens littéral. L'imaginaire sous tend la pratique de l'analogie*. En définitive nous procédons plus par la création d'images* que par l'élaboration de concepts*, par l'imagination que par la raison*. L'imagination est un pouvoir psychique de simulation* d'une réalité non présente ou non encore advenue. C'est le règne du « comme si* ». L'imagination apparaît à l'origine de la spatialisation des représentations mentales et de la temporalisation de la conscience

Qu'il soit personnel ou collectif, individuel ou social, l'imaginaire a une structure*. Il existe des structures anthropologiques de l'imaginaire. De Jung* (imaginaire de l'alchimie*), à Bachelard* (imaginaire des éléments), et Lévi-Strauss* (imaginaire de la mythologie), Henri Corbin et Mircea Eliade (imaginaires religieux) on assiste au décryptage des structures de l'imaginaire. Gilbert Durand attribue l'imaginaire à une angoisse existentielle devant la mort, c.a.d. la cessation du temps. Il distingue trois structures fondamentales de l'imaginaire liées aux régimes diurne et nocturne. Chez les psychanalystes il y a une circulation continue entre les trois concepts de réel*, symbolique* et imaginaire.

Tous les philosophes du XX^e siècle ont donné une interprétation de l'imaginaire. Phénoménologique* selon Husserl*, ontologique* selon Heidegger*, existentielle selon Sartre*, poétique selon Bachelard*, dialectique* selon Merleau-Ponty, herméneutique selon Ricoeur. Tous les philosophes post-modernes* ont une interprétation propre de l'imaginaire. De Lacan, Althusser et Foucault à Kristeva et

Lyotard. On ne saurait surestimer le rôle central de l'imaginaire dans le fonctionnement de l'esprit humain. Un rôle qui avait été déjà largement souligné par Malebranche* et Vico*.

La science qui se veut un discours objectif sur le réel, fait un usage massif de l'imaginaire et un emploi universel du symbole. C'est par l'imaginaire qu'elle étend son propos et colonialise des territoires nouveaux. L'imaginaire est à la source de la naissance des objets mathématiques qui ne sont pas imposés par une réalité extérieure. Ainsi en est-il du temps* que l'on représente par une droite sur laquelle il ne coule pas à l'image du fleuve. Considérer un ensemble d'objets comme un seul objet relève de l'imaginaire. Un nombre complexe (imaginaire) est l'ensemble de deux nombres réels. Une fonction* ou une distribution* sont des êtres imaginaires.

Le vide quantique* est une construction de l'esprit qui permet de dire ce que l'on ne saurait pas dire autrement. Ce lexique veut convaincre que le réel dont parle la science est biaisé par l'imaginaire et le virtuel, ce qui a forcément des conséquences pour la connaissance de la nature. Une fréquentation assidue de la théorie de la perception des couleurs* ne peut que renforcer dans cette conviction. La lecture de Helmholtz* ne peut qu'ouvrir les yeux sur le fictionnalisme* et le symbolisme* qui règnent en physique.

IMAGINATION SCIENTIFIQUE

L'imagination joue un rôle considérable dans la formation de la connaissance scientifique. Contrairement à ce que pensait Bachelard*, pour qui le chemin vers l'abstraction scientifique fait de l'imagination un obstacle. On voit généralement l'activité scientifique comme une utilisation de méthodes logiques rigoureuses. En fait c'est une activité symbolique qui puise sa vigueur dans l'imaginaire. On peut surprendre ce recours à l'imaginaire lors de la constitution de modèles*, dans cet entre deux flottant entre le modèle et la théorie. La rareté de témoignages sur ce rôle de l'imaginaire rend le sujet difficile à exemplifier. Et pourtant tout l'électromagnétisme a été bâti sur une pléiade d'images, dont les modèles hydrodynamiques de Maxwell* sont le meilleur exemple. Et pourtant l'abondance des simulacres* en science indique bien la présence de la fonction imaginaire. Les diagrammes de Feynman* avec leur ballet de particules virtuelles* en sont un bon exemple.

L'imagination n'est pas seulement un fait individuel mais se trouve étroitement liée au statut de la vision dans la culture d'une époque, déterminant le rapport du savoir au voir. Un statut qui

influence profondément le caractère de la démarche scientifique au même titre que celui de l'expression artistique. Un parallélisme qui suffit à lui seul à révéler les liens profonds qui existent à chaque époque entre le caractère de la science et le caractère de l'art. Démontrant amplement la liaison profonde entre la perception et le langage que s'emploient à révéler dans les détails les sciences cognitives* d'aujourd'hui, qui insistent à juste titre sur l'importance des métaphores* visuelles à côté des métaphores corporelles dans les formulations de la connaissance. Et cependant l'histoire fait mentir les rapprochements hâtifs d'étymologies distinctes en montrant que savoir ce n'est pas toujours voir, ou que voir ne suffit pas à savoir. Il n'en reste pas moins que de nombreux moments forts de la science sont intimement liés à l'extension de notre vision grâce à des dispositifs technologiques. Tel le télescope et le microscope, la photographie et le cinéma, ainsi que de nos jours l'imagerie médicale et l'imagerie du nanomonde. Voir le cerveau en action (RMN fonctionnelle) ou voir les atomes (microscope à effet tunnel), sans parler bien sûr de l'exploration visuelle de la Lune ou de Mars par retransmission à distance d'images photographiques, sont des exploits qui alimentent l'imaginaire tout court avant même de nourrir l'imaginaire scientifique.

Alors que biologiquement vision et langage se présentent comme largement entremêlés, ils s'opposent souvent dans la culture d'une époque. On voit tantôt privilégier le langage, le discours, le raisonnement comme sources de certitude sur le monde et garanties de la vérité. C'est le règne de la démonstration et de la rhétorique, de l'argumentation et de la logique. Tantôt on voit dominer le pouvoir des images et des représentations visuelles. De tout temps rationalité et imagination visuelle sont opposés, et ce conflit sous-tend bien des polémiques religieuses, scientifiques ou artistiques. Témoins la crise iconoclaste dans le monde byzantin ou la querelle des poussinistes et des rubénistes au XVII^{ème} siècle.

On ne peut pas alors ne pas être frappé par le curieux cours historique de la science de la logique dans la pensée occidentale. Les historiens de la logique font en effet remarquer que la logique n'a connu en Occident (monde islamique inclus) que trois périodes fastes, chacune relativement courte. La période de l'antiquité grecque, entre 350 et 200 avant J.C., celle où Aristote fonde la logique comme règle de l'argumentation. La période médiévale –la plus longue- de 1100 à 1450, avec en particulier l'œuvre de Guillaume d'Ockham*. La période moderne depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, période de la logique mathématique. Boole, Peano, Frege, Russell en sont les héros.

Dans les intervalles de plusieurs siècles, rien ou presque rien, si ce n'est de citer Boèce (480-524) et Leibniz (1646-1716).

Ce n'est sans doute pas une coïncidence si dans le trou de la logique entre 1450 et 1850 s'installent l'art de la Renaissance avec ses héritiers et la science expérimentale, fondement de la science moderne.

Rendre compte du monde visible. Justifier le développement d'une société dominée par la production « industrielle » et où la marchandise devient une valeur centrale. Une société où avoir raison consiste à posséder et manipuler des objets fabriqués ou des objets de la nature. Une société où savoir c'est pouvoir et où pouvoir nécessite de voir.

Dans son très beau livre, Amos Funkenstein, consacre un chapitre entier au changement d'idéal de connaissance dans la société de la fin du moyen-âge. Il décrit l'apparition d'un idéal de la connaissance par « l'action », opposé à l'idéal d'une connaissance contemplative.

« Ce nouvel idéal énergétique de la connaissance était directement en opposition avec le vieil idéal contemplatif. La plupart des épistémologies antiques et médiévales avaient eu en commun un caractère réceptif : que la connaissance ou la vérité fut atteinte par abstraction à partir des données sensibles, par illumination ou encore par introspection, elle était trouvée et non construite. Au contraire, explicitement ou non, la plupart des « sciences nouvelles » du XVII^{ème} siècle postulaient une théorie constructive de la connaissance. »

La montée en puissance au XVII^{ème} siècle de la vision mécaniste du monde et de son idéal d'action, vient concrétiser un mouvement en place depuis le XV^{ème} siècle.

Après avoir réuni la théologie et la raison avec Maïmonide*, Averroes et Thomas d'Acquin*, l'occident médiéval se met en devoir de prouver les vérités de la foi par les actes et les images. Au règne de la scholastique succède celui de l'optique et de la représentation comme règles de l'action. Ce rôle croissant de la vision dans l'établissement de la certitude à partir du moyen-âge tardif, commence à peine à être étudié. William Whitney commente ce point dans sa thèse¹.

« Au XV^{ème} siècle, le rôle joué par l'optique dans la codification des idées, dans l'organisation de la syntaxe intellectuelle est central. C'est donc avec la vision, avec ce qui est vu, qu'on est sûr de ce qu'on sait. »

Et de rappeler que des débats scholastiques avaient déjà comme thème central la connaissance par la vision. Ainsi Guillaume d'Ockham déclare :

« Ce qui est représenté doit être connu avant (d'être représenté) ; autrement le représenté ne conduit pas à la connaissance de ce qu'il représente » (Cf. Représentation*)

Traduisant ainsi un manque de confiance dans la vision et la représentation pures. Manque de confiance reflétant les discussions médiévales sur la psychologie cognitive, dans le cadre complexe de la philosophie aristotélicienne. Discussions dominées par les controverses sur la notion de *species* (espèce), particulièrement élaboré chez Thomas d'Acquin. L'espèce est ce qui manifeste un être. Les accidents perceptibles d'un être matériel, ses qualités sensibles sont appelés ses espèces. Les espèces ont une existence autonome en ce qu'elles sont émises par l'objet et transmises aux organes de perception. Les discussions portaient sur la réalité de ces espèces et s'interrogeaient sur la manière dont le cerveau acquiert une connaissance véritable, qui est la connaissance non pas des accidents mais la connaissance générale, la connaissance de la quiddité. Dans ce but Thomas suppose une activité connaissante autonome du cerveau. Ce dernier ne se borne pas à recevoir les impressions communiquées par les *species*, n'a pas un rôle de récepteur purement passif, mais manifeste une activité propre qui permet l'accès à la véritable réalité. Idée qui peut sembler difficile à soutenir dans le contexte scientifique de l'époque. Il est piquant de remarquer que c'est pourtant une idée de ce genre qui est défendue aujourd'hui par les sciences cognitives de la vision. Ces mécanismes compliqués de la vision n'étaient pas unanimement acceptés, et la décadence de l'influence de la philosophie aristotélicienne a sans doute contribué à leur élimination. Comme l'écrit P. Hamou :

« L'abandon quasi unanime de la doctrine scholastique des espèces intentionnelles est certainement un symptôme important du fait qu'à l'âge classique le cadre conceptuel de la théorie de la perception a subi une mutation profonde »

Cette mutation accompagne la naissance de la science moderne et l'on n'en finirait pas de discuter pour savoir si c'est la mutation scientifique qui entraîne la mutation du regard ou vice-versa. Il n'en reste pas moins que l'on voit la vision devenir le sens dominant du monde moderne au service non plus exclusivement de la religion mais aussi de l'activité socio-économique. Une vision élargie par les procédés et les innovations technologiques : la perspective, les miroirs argentés, le télescope et le microscope.

Une vision du monde commune à l'art et à la science. D'où l'apparition des artistes savants de la Renaissance.

Comme tout mouvement entraîne un contre mouvement, il ne faut pas s'étonner, qu'à la montée en puissance d'une culture visuelle, qui atteindra son paroxysme à l'époque baroque, viennent s'opposer des positions qui jettent l'opprobre sur la vision. Le contre visuel a toujours existé. Témoins les crises iconoclastes dans l'empire byzantin, la réforme cistercienne de saint Bernard au XIII^{ème} siècle ou le réforme protestante.

Aux excès et à l'exubérance de la visualité qui tendaient à accréditer une confusion, sinon une identité, entre le visible et le réel, va s'opposer une intellectualisation, une spiritualisation de la vision. Avec un mouvement parallèle de la science.

A l'enthousiasme de la visualité et des nouvelles technologies qui l'amplifiaient, laissant espérer la constitution d'une physique en acte (ignorant la puissance aristotélicienne), et constituant les fondements mêmes de la science expérimentale, va succéder une reconquête lente de la physique par une pensée platonicienne, sous couvert de mathématiques de plus en plus abstraites et de moins en moins géométriques. Il suffit de rappeler ici que les « Principia Mathematica Philosophiae Naturalis » de Newton abondent de figures alors que moins d'un siècle plus tard la « Mécanique analytique » de Lagrange n'en comporte aucune.

Ces affrontements entre le visuel et le non visuel, l'empirisme* et le rationalisme* s'expriment dans les quatre grands « programmes scientifiques* » du XVII^{ème} et du XVIII^{ème} siècles.

Dans « Théologie et imagination scientifique du Moyen-âge au XVII^e siècle » Amos Funkenstein se livre à une analyse minutieuse de la façon dont l'imagination scientifique prend comme sources une théologie sécularisée. De grandes notions théologiques sont à l'origine de bien des concepts de la science moderne naissante (Cf. Science et religion*).

L'omniprésence divine et le corps de Dieu firent que l'on se mit à exiger aussi de la nature elle-même qu'elle fut homogène, uniforme et symétrique. Les mêmes lois de la nature devaient s'appliquer aussi bien au ciel que sur la terre, contrairement à ce qu'affirmait Aristote*. Toutes les parties de l'univers devaient être faites d'un même genre de matière, régi par les mêmes causes ou forces. Voilà bien l'axiome de base d'une philosophie de la nature. Pour autant qu'il requiert une explication monocausale de la nature, l'idéal du mécanisme* exprimé par Newton* est bien proche de l'idéal d'uniformité. Pour Newton l'espace et le temps sont toujours égaux à eux-mêmes. C'est parce

qu'ils sont à tout égard homogènes que la nature peut l'être à son tour, les mêmes lois de la nature étant partout valides.

La toute puissance divine est le garant de l'existence de lois de la nature universelles. Leibniz y voit le garant de son principe de raison* suffisante.

Kant* fut à l'origine de la dé-théologisation de la science, inaugurant ainsi une nouvelle conception de la science, qui est encore la nôtre, séparant science et religion. Sans pour autant tarir les sources de l'imagination scientifique.

IMITATION (Cf. Mimésis*)

IMMANENCE

L'immanence est le caractère d'avoir son principe en soi-même. Un principe métaphysique immanent est donc un principe dont l'activité non seulement n'est pas séparable de ce sur quoi il agit, mais il le constitue de manière interne. Ce concept s'oppose à la transcendance*, qui est le fait d'avoir une cause extérieure et supérieure.

L'immanence d'un fait physique signifie qu'il constitue une réalité ontologique* et ne fait pas référence à son observation*. Opposition entre caractère ontologique et caractère épistémique*.

IMPULSION (Quantité de mouvement)

Quantité vectorielle égale au produit de la masse d'un corps par sa vitesse. L'impulsion d'un système mécanique est égale à la somme vectorielle des impulsions de toutes ses parties. Pour un système fermé (en l'absence de toute force) la loi de conservation* de l'impulsion stipule que l'impulsion reste constante pour tous les processus intérieurs au système, et peut seulement se redistribuer entre les parties par suite de leur interaction. Le recul d'une arme à feu ou un réacteur d'avion sont les témoins de cette loi. En accord avec le théorème de Noether* cette loi correspond à l'invariance du système par translation (homogénéité de l'espace).

INCERTITUDE

La notion d'incertitude appartient à la catégorie épistémique*. C'est l'incertitude de nos connaissances. Il n'ya là aucune allusion ontologique* et métaphysique* sur l'objet dont on parle. Il s'agit seulement du caractère insuffisant de notre connaissance de l'objet,

limitant en particulier les prévisions* et les prédictions* sur son comportement expérimental. Mais il n'y a pas là nécessairement une renonciation à une causalité métaphysique, donc indéterminisme*. Les situations où la contingence* ou le hasard* se manifestent sont des situations d'incertitude. On confond souvent incertitude et indétermination*.

Les inégalités de Robertson* s'interprètent comme principe d'incertitude de Heisenberg*, mais ne comportent aucune allusion à un quelconque indéterminisme*. Une confusion allègrement entretenue dans les écrits de vulgarisation de la mécanique quantique*.

INCONSCIENT

Activité inconsciente du cerveau révélée par l'électrophysiologie et la RMN fonctionnelle*.

Cet inconscient expérimental se distingue de l'inconscient méthodologique de Freud* dans la psychanalyse*.

INCOMMENSURABILITE

Avec les notions de paradigme* et de révolution scientifique* l'incommensurabilité est l'une des trois expressions les plus influentes d'une nouvelle philosophie des sciences organisée autour de l'œuvre de T. Kuhn* et de P. Feyerabend*.

Il s'agit de caractériser la situation où deux théories concurrentes n'ont pas de commune mesure ou de domaines communs permettant le passage de l'une à l'autre. Cela signifie qu'il n'existe pas de langage commun aux deux théories, sans doute parce que le sens même de leurs constituants fondamentaux a changé. Les deux théories ont beau employer les mêmes mots, le sens qu'elles leur attribuent n'est pas le même. Ainsi en est il pour l'espace* et le temps* entre la mécanique classique et la relativité. C'est le cas pour la notion d'observable* entre la physique classique et la physique quantique. C'est sans doute le cas entre gravitation* et mécanique quantique*.

La science est partagée entre incommensurabilité et unité*.

INDECIDABILITE (Cf. Décidabilité*)

INDEPENDANCE

Deux événements sont dits indépendants lorsque l'on peut penser qu'il n'existe entre eux aucune liaison directe de cause à effet. Lorsque les conditions de production d'un événement n'entraînent pas la production de l'autre. En théorie élémentaire des probabilités* ceci se traduit par le fait que la probabilité de l'évènement conjoint est égale au produit des probabilités des événements individuels. Mais la définition rigoureuse de l'indépendance est délicate.

Ainsi la théorie des probabilités* considérée historiquement comme une théorie des lois du hasard*, n'est en fait qu'une théorie mathématique de la dépendance et de l'indépendance d'évènements quelconques. L'indépendance y est définie phénoménologiquement et rien dans cette théorie ne permet d'en donner une raison, à fortiori une origine. Dans son travail fondateur de la théorie axiomatique des probabilités*, Kolmogorov* considérait que la notion d'indépendance occupe une place centrale dans la théorie des probabilités, tout en remarquant qu'un des problèmes les plus importants de la philosophie des sciences* se trouve dans l'explicitation et la définition précise des conditions qui permettent de considérer comme indépendantes des données correspondant à des phénomènes réels. Et de considérer que cette question se trouvait alors en dehors de son travail. Quarante ans plus tard il verra une réponse à cette question dans la théorie de la complexité aléatoire*. Mais entre temps il avait participé à la mise en évidence de la notion d'indépendance dans les phénomènes pseudo aléatoires* caractéristiques du chaos déterministe*.

INDEPENDANCE DES SYSTEMES D'AXIOMES

Dans une théorie axiomatique* le fait que les divers axiomes de base ne sont chacun pas une conséquence logique des autres.

INDETERMINATION

Absence de sens précis ou de valeur précise d'une grandeur physique. Absence de détermination précise d'un concept par les faits, d'une théorie par l'expérience. C'est un concept objectif* et épistémique*. Ce qui le distingue de l'incertitude*, subjectiviste. L'indétermination entraîne l'incertitude. C'est en ce sens que les relations d'indétermination de Heisenberg* peuvent être considérées comme des relations d'incertitude.

INDETERMINATION DE LA THEORIE PAR L'EXPERIENCE (Duhem-Quine – Thèse de)

INDETERMINISME

L'indéterminisme est soit l'absence de causes soit la trop grande quantité ou complexité des causes rendant la notion de cause inopérante.

Si l'on oppose indéterminisme à déterminisme* on ne peut identifier indéterminisme et hasard*, puisqu'il existe des comportements chaotiques déterministes. La confusion entre relations d'incertitude de Heisenberg* et indéterminisme brouille ainsi le paysage épistémologique, dans la mesure où l'on ne connaît pas l'origine des probabilités en mécanique quantique, tout en niant ainsi par avance toute formulation déterministe de celle-ci.

Malheureusement le recours à l'indéterminisme relève plus d'une position métaphysique* que d'une réalité scientifique contrôlable. Il renvoie souvent au problème du libre arbitre* (Cf. Libre arbitre et mécanique quantique*).

Il faut aussi distinguer un indéterminisme ontologique* (indéterminisme), lié au monde, d'un indéterminisme épistémique* (incertitude* indétermination*), lié à notre connaissance. L'indéterminisme véritable ne peut être prouvé, alors que l'incertitude est un fait expérimental. C'est en ce sens que les relations d'incertitude de Heisenberg ne sont en rien des relations d'indéterminisme mais plutôt des relations d'indétermination* ou d'incertitude*. Pas plus d'ailleurs que les systèmes auto-référents* ou les systèmes formels incomplets selon le théorème de Gödel*.

René Thom considère que la liberté de l'homme pour agir s'appuie sur les régularités et la capacité à agir : "*Ainsi, la liberté humaine qui, a priori, fait échec au déterminisme, s'appuie sur lui pour agir, pour forger ses intentions et déterminer ses projets. Ce paradoxe, je crois est au cœur du déterminisme 'scientifique' "*

INDICE

L'indice est un signe* où le signifiant* renvoie directement au signifié* ou au référent*

INDISCERNABILITE (PRINCIPE D')

Principe fondamental de la M.Q. selon lequel on ne peut pas distinguer expérimentalement deux particules identiques. En

mécanique quantique on ne peut distinguer, comme on le faisait en physique classique, deux particules identiques, car on n'a pas de trajectoires* et seulement des états* indiquant des probabilités de présence. Dans un cadre quantique, on ne peut plus numéroter les particules dans un état initial, et les suivre à la trace pour les identifier dans l'état final. Une particule a la probabilité de se trouver là où pourrait se trouver une autre avec la même probabilité. Mais ce principe ne découle pas simplement de la structure probabiliste de la M.Q. C'est un nouveau principe, inévitable de par la conception même de la M.Q., aux conséquences considérables.

Ce principe, qui s'applique au seul discours que l'on a, à priori, sur les particules, le discours de l'état*, implique la symétrie des états* (des fonctions d'ondes*) par échange des particules, dans un système de N particules identiques. Echange qui n'a pas lieu dans l'espace physique mais dans l'espace de configuration* à $3n$ dimensions. C'est un principe de symétrie (pour les bosons*) ou d'antisymétrie (pour les fermions*). Ce principe de symétrie correspond au principe d'exclusion de Pauli* pour les électrons, et explique l'existence d'une interaction quantique spécifique à courte distance entre particules identiques, l'interaction d'échange*. Cette interaction entre électrons identiques est à l'origine de la stabilité de la matière*.

Ce principe engendre des états enchevêtrés* avec corrélation* à grande distance.

Rarement un principe aussi simple, relayé par l'appareil mathématique d'une théorie, aura eu des conséquences aussi dramatiques pour la philosophie naturelle contemporaine. Il en est le fondement essentiel avec les principes de la théorie de la relativité restreinte.

INDIVIDUATION (PRINCIPE D')

INDIVIDU BIOLOGIQUE

INDUCTION

Démarche de la pensée qui permet la constitution de lois, d'hypothèses ou de théories et de prédictions en partant de faits bruts ou de données expérimentales. Dans ce schéma la science part de l'observation de faits dont elle tire des hypothèses que l'expérimentation permettra de valider et de transformer en lois. L'induction à partir des faits s'oppose à la déduction* à partir d'axiomes*.

Duhem* avait déjà fait remarquer que l'induction pure n'existait pas et que l'interprétation de la moindre expérience scientifique suppose l'emploi de tout un appareil théorique.

Il a fallu longtemps pour que l'on se rende compte du caractère fruste et inadéquat de cette construction théorique de la science et qu'avec les travaux de Popper* et de Lakatos* on prenne conscience des lacunes de l'inductivisme : il n'y a pas de fondement logique à l'induction, la science procède par essais et erreurs et doit se contenter de réfuter les hypothèses librement construites par le chercheur sans pouvoir les valider directement.

INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

C'est en 1831 que Michael Faraday découvre le phénomène d'induction, il découvre qu'un courant électrique est créé dans un conducteur lorsqu'il est soumis à un champ magnétique variable. Plus généralement c'est l'apparition d'un champ électrique, d'un courant électrique ou d'une polarisation lors de la variation dans le temps d'un champ magnétique ou du mouvement d'un milieu matériel dans un champ magnétique. Phénomène décisif dans l'établissement de la réciprocité entre l'électricité et le magnétisme qui fait la beauté des équations de Maxwell de l'électromagnétisme*.

INDUCTION MAGNETIQUE

INERTIE

L'inertie d'un objet est la résistance qu'il oppose à toute force qui modifierait son mouvement. C'est un attribut* de l'objet.

Elle se manifeste dans la conservation de la vitesse dans un mouvement linéaire en l'absence de force* extérieure. La loi de Newton, exprimant la force comme produit de la masse* par l'accélération, montre que la masse est une mesure de l'inertie dans un mouvement linéaire.

Pour un mouvement de rotation l'inertie est mesurée par le moment d'inertie*.

INFERENCE INDUCTIVE

INFINI (en mathématiques)

Concept apparaissant dans divers domaines des mathématiques en opposition au concept de finitude* ou de discrétion*. Il est utilisé dans l'analyse* et la géométrie* pour désigner des éléments infiniment éloignés ou en théorie des ensembles* et en logique* lors de l'étude des ensembles infinis. Il cherche à formaliser les propriétés de ce qui n'a pas de fin.

Le problème de l'infini a une longue histoire depuis les anciens grecs jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. En philosophie comme en mathématique il a des facettes multiples, et apparaît dans différents problèmes sous des noms différents. Le continu*, l'irrationalité* ou la notion de limite* en sont des aspects.

Les grandes interrogations apparaissent dès l'antiquité. Zénon d'Elée (V^e siècle avant J.-C.) avec ses paradoxes* sur la divisibilité à l'infini d'un segment de droite, les Pythagoriciens (VI^e siècle avant J.-C.) avec leur découverte de l'incommensurabilité de la diagonale du carré, Eudoxe (début du IV^e siècle avant J.-C.) dont la théorie des proportions permet de traiter de tels incommensurables (livre V d'Euclide), Aristote (IV^e siècle avant J.-C.) pour qui le continu* est « divisible à l'infini en puissance* » (livre III de la *Physique*).

Le grand mathématicien René Thom* avait l'habitude de dire qu'Aristote était le seul penseur du continu avant l'époque contemporaine.

« Aristote avait tenté dans sa Physique, de construire une théorie du monde fondée non sur le nombre, mais sur le continu. Il avait ainsi réalisé (au moins partiellement) le rêve que j'ai toujours entretenu de développer une mathématique du continu qui prenne le continu comme notion de départ, sans aucun appel (si possible) à la générativité intrinsèque du nombre. Aristote a été pendant des siècles (peut être des millénaires) le seul penseur du continu ; c'est là à mes yeux son mérite essentiel ».*

L'infini c'est, dit Aristote, « ce qui ne se laisse pas parcourir et n'a pas de limite ». N'ayant pas de limite, il ne peut être « déterminé » et n'existe pas en soi. Si quelque chose comme une substance, c'est-à-dire un être « entier et achevé », était infinie, ne devrait-on pas dire que ses parties aussi sont infinies ? Et ne serait-on pas alors conduit à reconnaître qu'un infini— celui du tout — est plus grand qu'un autre — celui d'une de ses parties ? On a là les deux principes qui empêchent de concevoir un infini en soi ou, comme dit Aristote, « en acte » : l'axiome, énoncé par Euclide au premier livre des *Éléments*, que le tout est plus grand que l'une quelconque de ses parties, et l'assomption qu'il ne saurait y avoir plusieurs infinis dont certains seraient plus grands que d'autres.

Aristote peut introduire la différence entre un infini actuel (acquis) et un infini potentiel (en construction), dans la mesure où il a introduit en philosophie la notion de possibilité (puissance*) et la notion d'actualité*. Deux catégories de l'existence*, le réel et le possible.

L'infini actuel est une conception de l'infini qui consiste à considérer un ensemble infini d'objets comme un objet complet, indépendant du processus de constitution des objets. Nous avons affaire à l'infini actuel quand nous considérons la suite des nombres naturels comme si tous ces nombres nous étaient donnés d'un coup, ou lorsque nous envisageons une figure géométrique comme un ensemble infini de points. L'infini actuel a un caractère idéalisé dans la mesure où la construction d'un ensemble infini d'objets est impossible. Dans la pratique mathématique l'utilisation de l'infini actuel se manifeste par la non prise en considération de la différence entre ensemble fini et ensemble infini. Ces derniers sont considérés comme si tous leurs éléments sont déjà construits et offerts simultanément

L'infini potentiel consiste à considérer un ensemble infini d'objets du point de vue de la construction de ces objets. On peut donner comme exemple l'infinité de la suite des nombres naturels*, considérée comme un processus de constitution graduelle par passage de n à $n+1$ en partant de zéro. Après chaque nombre il y'en a un de plus grand. L'infini potentiel est une notion idéalisée, car on ne peut la concrétiser de par la limitation de la vie et des moyens matériels. L'infini potentiel est une vue de l'esprit. Il est cependant intuitivement plus clair que l'infini actuel.

Les systèmes infinis d'objets mathématiques (les nombres naturels* ou les nombres réels*) ne sont jamais donnés par une simple énumération comme cela est possible pour un système fini. Il serait absurde de supposer que quelqu'un ait représenté l'ensemble des nombres naturels en les énumérant les uns après les autres. En fait on étudie les nombres naturels selon le processus de formation de ses éléments par passage de n à $n+1$. Dans le cas du continuum des nombres réels la considération d'un élément-un nombre réel, amène à l'étude du processus de formation de ses valeurs approchées successives, et la considération de tout l'ensemble des nombres réels amène à l'étude des propriétés générales de ce processus de formation des éléments. C'est là précisément que le sens de l'infini des nombres naturels ou des systèmes de tout les nombres réels (continuum) peut être qualifié de potentiel. Les nombres ne sont pas donnés d'avance mais construits.

La représentation de grandeurs variables infiniment petites ou infiniment grandes est à la base de l'analyse mathématique*.

L'intérêt fondamental et les difficultés fondamentales des doctrines de l'infini se concentrent dans les problèmes de la nature des ensembles infinis d'objets mathématiques. La théorie des ensembles* de Georges Cantor* révolutionne le problème de l'infini.

En 1874 Cantor prouve que l'ensemble des nombres réels* algébriques*, c'est-à-dire des nombres réels racines d'un polynôme à coefficients entiers, a le même cardinal* que l'ensemble des entiers naturels (infini dénombrable), mais que l'ensemble des nombres réels, qui, en plus des algébriques, comprend les nombres transcendants* (comme la constante d'Euler ou le nombre π), a un cardinal plus élevé correspondant au continu*.

Il formule, l'hypothèse du continu, qui affirme, qu'il n'existe aucun ensemble dont le cardinal est strictement compris entre le cardinal de l'ensemble des entiers naturels et celui de l'ensemble des nombres réels. Tout sous ensemble infini du continu est soit dénombrable soit continu. Il n'y a pas d'ensemble dont le cardinal se situe entre le dénombrable et le continu.

En d'autres termes : tout ensemble strictement plus grand, au sens de la cardinalité, que l'ensemble des entiers naturels doit contenir une « copie » de l'ensemble des nombres réels. Il formula cette hypothèse, qui résultait d'une analyse des sous-ensembles de la droite réelle, et de sa hiérarchisation des cardinaux infinis, mais il tenta en vain de la démontrer. Cette démonstration constituait le premier de la célèbre liste des 23 problèmes de Hilbert, que celui-ci avait établie pour le congrès international des mathématiciens de 1900 à Paris, afin de guider la recherche en mathématiques du siècle alors naissant.

Ce n'est que bien plus tard, en 1963, que Paul Cohen a montré que cette hypothèse ne pouvait se déduire des axiomes ordinaires de la théorie des ensembles. L'hypothèse du continu est indécidable* dans l'axiomatique ordinaire: on ne peut ni l'y démontrer, ni l'y réfuter.

Les courants intuitionnistes* et constructivistes* prétendent formuler la mathématique sans faire appel à la notion d'infini actuel, en se bornant à celle d'infini potentiel.

La dualité fini/infini continue de tracer dans le champ mathématique une ligne de partage, que les mathématiciens redéfinissent sans cesse sans jamais l'abolir.

INFINI (en physique) (Cf. Physique et infini*)

INFORMATION

Au sens large, la notion d'information recouvre celle de renseignement, d'ensemble de données ou de faits cognitifs.

Le développement au XX^{ème} siècle de moyens techniques de communication de masse d'informations (téléphone, radio, télévision, ordinateurs et systèmes de commande automatique) donne naissance à une science nouvelle que l'on peut globalement désigner du nom de Cybernétique*. C'est dans ce cadre que la notion d'information a pris un caractère quantitatif aux dépens du caractère sémantique général.

Dans la théorie mathématique de la communication de Shannon* on définit la quantité d'information contenue dans un évènement comme une grandeur inversement proportionnelle à la probabilité de cet évènement. Plus un évènement est inattendu, peu probable, plus sa survenue ou la nouvelle de sa survenue fournit de l'information. L'information est une mesure de l'incertitude qui prévaut avant la survenue d'un événement et se mesure par le nombre de questions à réponses doubles (oui ou non) nécessaires pour lever cette incertitude. Une situation d'ordre où tout est prévisible ne peut fournir aucune information. La notion d'information est réduite à sa plus simple expression, c'est à dire au fait même qu'un événement se soit produit. Mais elle dépend évidemment de ce que l'on considère comme un événement. Cette théorie ne tient compte ni du sens, ni de l'origine, ni de la cause de l'information. L'un des principaux apports de Shannon réside dans la possibilité de dissocier quantité et signification de l'information : la quantité d'information contenue dans un message est une caractérisation de la structure du signal indépendamment de toute référence au sens du message. Disjonction majeure entre le signifiant* et le signifié*.

Le concept quantitatif d'information joue dans la science du XX^{ème} siècle le même rôle qu'a joué l'énergie dans la science du XIX^{ème} siècle ou la matière dans la science classique. Et comme l'a dit N. Wiener*, un des pionniers de la Cybernétique: l'information, ce n'est pas la matière, ce n'est pas l'énergie, c'est l'information. Pourtant on imagine mal que l'information puisse exister sans support matériel et sans manifestations énergétiques. Grand débat au cœur de toute la science contemporaine qui souffre endémiquement de "dématérialisation".

Le concept d'information apparaît dans différentes théories : la théorie statistique des signaux et de la communication (Shannon*), la

théorie de l'inférence* statistique (Fisher*) et la théorie de la complexité* (Solomonoff*, Kolmogorov*, Chaitin*).

Le vide quantique n'est pas une substance*, mais un état*, donc une information.

L'information, comme le vide, sont des noms abstraits et non pas des noms singuliers désignant une réalité localisable dans l'espace temps.

L'information constitue un paradigme fondateur d'une vision d'ensemble de la connaissance scientifique au même titre que la complexité* ou la structure*.

INFORMATION BIOLOGIQUE

Au début des années cinquante les biologistes s'étaient accoutumés à l'idée que les gènes* transportaient une information codée déchiffrée par la cellule.

Les travaux sur la transmission de l'information et le décodage avaient été parmi les deux plus grande priorités scientifiques pendant la Seconde Guerre Mondiale, et les technologies de la communication continuaient à se développer dans la période de l'après guerre, influençant le cadre de pensée des biologistes parmi d'autres.

Les travaux des biochimistes généticiens sur la levure *Neurospora* avaient montré que les gènes pouvaient déterminer la production d'enzymes, c.a.d. de protéines. Lorsque Watson et Crick dévoilèrent la structure de l'ADN*, on ramena très rapidement le problème de l'influence des gènes sur la cellule à celui de la manière dont la succession des quatre nucléotides* dans l'ADN pouvait coder pour les vingt acides aminés des protéines. Après plusieurs années de travail on établit que ce code était constitué par des triplets de nucléotides. Le code génétique*. Il fallut encore beaucoup de travaux pour montrer de quelle manière ce code était transmis du noyau cellule* au cytoplasme. C'est le sujet de la biologie moléculaire*.

INFORMATION (épistémologie de l')

Le problème fondamental de la notion d'information réside dans son objectivation, tant les tentations de subjectivité sont grandes. C'est la question centrale de l'épistémologie : les concepts d'une théorie physique correspondent ils à des « objets de la nature » ou ne sont-ils que des signes fonctionnels qui assurent la cohérence et le succès global de la théorie. Sommes-nous constamment menacés d'holisme sémantique ?

Le physicien a-t-il déjà « vu » une information autre que conceptuelle ou métaphorique. On peut se poser la même question pour la matière, l'énergie, l'espace, le temps.... le vide.

L'objectivation dépend des expériences sensori-motrices et des consensus sociaux.

La matière résulte d'un accord entre observateurs sur les expériences de choc, d'inertie, de gravitation et de manipulation d'objets (et de marchandises).

Poincaré parlant des expériences de Jean Perrin sur la détermination du nombre d'Avogadro s'exclame : « Les atomes existent puisque l'on peut les compter ». Mais pendant près d'un siècle encore on ne verra pas les atomes.

Les voit on vraiment aujourd'hui avec le microscope à effet tunnel ? Que voit on vraiment ? Ce que les traitements informatiques choisissent d'isoler.

Et cependant on manipule les atomes avec le STM. Que manipule-t-on vraiment ? L'atome d'hydrogène n'est encore rien d'autre que l'équation de Schrödinger de l'atome d'hydrogène. Un signe dans une théorie.

A-t-on déjà vu une force ou de l'énergie ?

Une force c'est la cause mystérieuse d'une accélération, une énergie c'est au mieux le produit d'une masse par le carré d'une vitesse et au pire une énergie potentielle (donc cachée). La théâtralité cosmique de l'énergie nucléaire ne change rien à cela.

Or voici qu'à la mécanique classique qui unifiait la physique par « figures » et « mouvements » sous la bannière des concepts fondamentaux « matière » et « énergie », se substitue la mécanique quantique, généralisation de la théorie des probabilités, qui impose à toute la physique sa démarche fondamentale d'étude de l'information* dans des espaces mathématiques abstraits. La mécanique quantique est de plus en plus considérée comme une théorie de l'information.

Issus de points de vue technologiques (la machine à vapeur, transmission des signaux radioélectriques), les concepts d'entropie et d'information ont acquis droit de cité au cœur même des théories fondamentales. Avec comme corollaire une ambiguïté viscérale : décrivons nous la réalité ou la connaissance de la réalité ?

On ne peut se résoudre à considérer la fonction d'onde en mécanique quantique (l'état) comme représentant uniquement la connaissance (l'information) accessible à l'observateur. Une connaissance cependant bien réelle puisque l'on sait la manipuler et la transférer, ce que prouvent les belles expériences sur la « téléportation* » atomique.

Comme tous les autres concepts de la physique, le concept d'information doit être jugé en fonction de son rôle explicatif ou tout simplement fonctionnel, ainsi que de la cohérence qu'il assure entre diverses théories.

Il a prouvé par exemple son utilité dans l'analyse du comportement des systèmes dynamiques inaugurée par Kolmogorov et qui a permis de caractériser l'existence du chaos déterministe. Le chaos, l'imprédictibilité et l'instabilité dans le comportement des systèmes dynamiques sont remarquablement caractérisés à l'aide de la notion d'information. L'entropie de Kolmogorov-Sinai*, traduction de l'entropie de Shannon dans l'univers des systèmes dynamiques, peut être interprétée comme une mesure moyenne de l'information nécessaire pour décrire chaque pas de l'évolution du système.

On n'a pas assez insisté sur l'énorme révolution conceptuelle de cette démarche. Car voici que le mouvement, longtemps lié à la matière, puis synonyme d'énergie, devient le théâtre d'un changement d'information. De là à considérer que le mouvement est avant tout l'expression d'une information, il n'y a qu'un pas que nous sommes en train de franchir. Tout mouvement est un calcul.....A un atomisme de la matière succède un atomisme des événements, l'information n'étant qu'un décompte d'événements élémentaires constituant l'événement global.

C'est là une autre vision du monde, en résonance comme toujours avec la technologie dominante. A l'ère de l'énergie, époque de la machine à vapeur et du moteur électrique, succède l'ère de l'information, époque de l'informatique. A une économie de l'énergie succède une économie du calcul. Sans oublier pour autant que l'information n'est pas un objet désincarné, mais se trouve fortement liée à la matière et à l'énergie. Tout comme pour le hasard (et les probabilités) il faut avoir clairement conscience de ce qui relève uniquement d'une théorie mathématique et de ce qui s'incarne dans notre expérience physique du monde.

Nous assistons à un lent processus de gésine conceptuelle où les démarches du calcul envahissent la vision de la nature et les modes d'expression artistiques. La prudence s'impose, car les charlatans se livrent à leurs habituelles dérives verbales.

Le livre (thèse) de Jérôme Ségal : « *Le zéro et le un. Histoire de la notion scientifique d'information au XX^{ème} siècle.* Editions Syllapse. Paris 2003 », constitue un excellent panorama de ce phénomène majeur de notre culture.

INFORMATION (Idéologie)

Toute la science contemporaine se transforme en s'appropriant le concept central d'Information, au point de promouvoir une véritable idéologie*.

L'information n'est plus simplement une donnée, mais elle doit être acquise, payée, transmise et exploitée.

Le problème essentiel qui se pose pour l'étude d'un système physique est l'acquisition et l'utilisation de l'information et non plus simplement l'évolution du système.

Ainsi c'est la mise en œuvre du concept généralisé d'information qui a été à la base d'un renouveau de la mécanique à travers la théorie des systèmes dynamiques. Le moment décisif dans l'élaboration de la théorie si étonnante du Chaos Déterministe, a été dans la considération des systèmes complexes comme des systèmes riches en information plutôt que déficients en ordre.

La théorie de la Relativité est une théorie de l'information sur l'espace et le temps.

La mécanique quantique est une théorie de l'information sur les systèmes microphysiques. Elle formalise le fait fondamental que l'information n'est pas inscrite par avance mais s'obtient par un processus physique de mesure qui peut perturber l'information déjà acquise. Tous les processus de mesure ne sont pas nécessairement compatibles entre eux, une mesure peut en perturber une autre et l'information recueillie est soumise à différentes limitations.

Ainsi la Science du XXème siècle privilégie le concept d'Information au dépens du concept de Mouvement. Ce faisant elle contribue à promouvoir une Idéologie de l'Information.

Succédant à une vision mécaniste (et atomistique) du monde, où la Nature, bonne fille, dévoile ses charmes inépuisables dont l'Homme cherche à s'emparer, apparaît une vision d'un monde complexe qu'il faut décrypter. La Linguistique se substitue au Mécanisme. Le XXème siècle, pour certains, se caractérise par ce "tournant linguistique".

C'est cette idéologie là qui pousse en avant la Technologie de cette fin de siècle. Cela résulte d'un choix social, où la Technologie veut incarner la part du rêve collectif. Dans la mesure où l'Histoire a porté les sociétés contemporaines vers un idéal de distribution des biens consommables, l'Information et la Signification semblent des biens plus faciles à diffuser. De toute façon l'Homme a toujours été grand consommateur de Symbole, ce qui est même sans doute son caractère

spécifique. Même la manipulation de la matière reste chez lui hautement symbolisée.

C'est dans ces conditions que la physique quantique, après avoir contribué à la constitution d'une idéologie dominante, va naturellement contribuer au développement d'une Technologie qui exprime cette idéologie: la Technologie Quantique*. Physique Quantique et Technologie Quantique expriment une même idéologie, celle des Signes sans Formes, celle des Formes Informes.

Une Idéologie qui se traduit clairement dans l'esthétique industrielle contemporaine.

Dans l'avant-propos du catalogue de l'exposition qui a eu lieu à Paris, au Grand Palais en 1993: "Design, miroir du siècle", on peut lire:

"L'ère mécaniste avait une esthétique structurelle et de ce fait naturelle. L'ouvrage d'art en reste l'archétype. Ses haubanages, ses tirants, ses piles donnaient à voir une construction (une figure) simultanément à une fonction.

La montre et ses rouages, la locomotive à vapeur et ses pistons, la grue et son "mécano", le vélo ... sont des objets autodémonstratifs exprimant de façon exemplaire une construction et son fonctionnement, une esthétique en oeuvre.

La généralisation de l'électronique et de l'informatique, accompagnée d'une miniaturisation constante des composants, engendre un univers de l'occultation où rien ne se voit plus et ne se donne à comprendre. Ce design occulte ("qui est caché sous une sorte de mystère" selon Littré) produit des abstractions, où rien de ce qui circule et de ce qui fonctionne ne prend forme. La forme, dont on voulait aux temps fondateurs et progressistes qu'elle suivit la fonction, ne suit plus rien, même pas la forme... Elle a pris son autonomie. Elle précède plus qu'elle ne procède."

François Barré

C'est la fonction qui tient lieu de forme. La structure abstraite s'impose au dépens des représentations spatio-temporelles. La Technologie et la Science Contemporaines abolissent l'Espace-Temps et la Matière au profit du Signe.

INFORMATION (THEORIE ALGORITHMIQUE) (Cf. Complexité aléatoire*)

INFORMATION GENETIQUE (Cf. Code génétique*)

INFORMATION QUANTIQUE

La mécanique quantique concentre la connaissance d'un système microphysique dans la notion d'état*. Toute l'information sur le système provient de la manipulation de l'état, par la préparation* et la mesure*. Il ne faut donc pas s'étonner si la conception de l'état et de ses propriétés peut être entièrement reformulée dans le cadre de la théorie de l'information*.

Cette reformulation va tenir compte de certaines spécificités de la notion d'état quantique pour laquelle toutes les opérations classiques ne sont pas réalisables.

Ainsi on ne peut réaliser une téléportation* par voie classique : un dispositif de type mesure testerait un état quantique et fournirait une information classique que l'on enverrait dans une procédure de préparation* pour obtenir un état indistinguable statistiquement de l'état de départ. Mais il n'existe aucun moyen de mesurer un état quantique « inconnu » de façon à pouvoir reconstruire ailleurs un état quantique identique.

Il est normal que la téléportation classique soit impossible car si elle était possible cela permettrait de contourner un certains nombres d'interdictions majeures de la mécanique quantique démontrables directement. Si la téléportation classique était possible on pourrait l'utiliser pour copier un état quantique inconnu (duplication* de l'état) ce qui permettrait à son tour d'effectuer la mesure simultanée d'observables non compatibles*.

Ce n'est que si la voie classique est adjointe à une voie quantique avec un état quantique enchevêtré* que la téléportation sera réalisable, au prix de la destruction de l'état quantique original : téléportation quantique*.

On appelle qubit (abréviation de quantum bit) la quantité d'information classique encodable dans un système quantique minimal, réduit à deux états de base (système à deux états*), c'est à dire un système dont les états se trouvent dans un espace de Hilbert à « deux dimensions ». Par extension on désigne par qubit un système quantique descriptible à l'aide de deux états de base.

Démarche à priori inhabituelle puisque la théorie habituelle de l'information ne se préoccupe pas de la réalisation physique des signaux. L'emploi de l'adjectif quantique avertit que la nature des porteurs de l'information va intervenir.

Si l'on considère un atome d'hydrogène décrit (approximativement) par son état fondamental et son premier état excité, on peut voir là l'analogie d'un système classique, la réalisation quantique d'un système de $(0,1)$, tout comme la présence ou l'absence d'un courant en est une réalisation classique. Mais la différence entre des systèmes à deux états classiques et quantiques tient à ce que la superposition des états quantiques permet à un système quantique à deux états de se trouver aussi dans n'importe quel état de superposition, ce qui est impossible pour un système classique. Ce qui fait dire qu'un système quantique peut se trouver simultanément dans les deux états « 0 » et « 1 ».

La distinction cruciale entre traitement classique de l'information et traitement quantique apparaît lorsque l'on cherche à utiliser les états de superposition pour la transmission de l'information. Nous avons vu que si l'on peut parfaitement copier un état classique ce n'est pas possible pour un état quantique (ce qui est dû en fait à la possibilité de superposition des états quantiques) Ce qui veut donc dire que l'information codée quantiquement ne peut pas être reproduite avec une fidélité absolue.

Parmi les exemples traditionnels de qubits citons, les particules de spin $\frac{1}{2}$, dont les deux états de base sont l'état de spin haut et l'état de spin bas, et le photon polarisé qui a deux états de base : polarisation verticale et polarisation horizontale.

Le problème que posent les états d'un système quantique est celui de leur distinguabilité. On ne peut pas en général distinguer facilement entre eux par des mesures les états non orthogonaux.

Ainsi si l'on prépare un qubit dans les états « 0 » et $(\text{« 0 »} + \text{« 1 »}) / \sqrt{2}$ on ne peut pas effectuer une mesure sur ce système qui permettrait avec certitude de dire lequel des deux états a été préparé. Seuls deux états orthogonaux peuvent être distingués par une mesure donnant l'une ou l'autre des valeurs associées à chaque état pour une observable convenable, si on sait la définir.

Alors que l'information classique, dont la finalité est de donner une mesure de l'identité des événements en quantifiant leurs différences, repose sur des phénomènes physiques parfaitement localisables et identifiables, le traitement quantique de l'information introduit des degrés de libertés supplémentaires par le biais des états non distinguables à l'aide d'une seule mesure. Ainsi alors qu'un courant électrique dont l'intensité se trouve entre les deux intensités de référence (0 et 1) est parfaitement identifiable comme tel par une seule mesure, un état de superposition des états de base ne peut pas être

repéré comme tel par une seule mesure, ni même être distingué des états de base.

On admet par ailleurs d'une manière générale que toute mesure, source d'information, modifie en principe l'état du système. Mais ce n'est pas la relation d'incertitude de Robertson* (Heisenberg) qui rend compte de ce fait. Il faut pour l'exprimer définir ce qu'est l'information obtenue sur l'identité de l'état quantique par une procédure de mesure et pouvoir comparer l'état quantique avant et après la mesure. Distinguer les états et quantifier l'information fournie par une mesure est un préalable à toute théorie du traitement quantique de l'information

Il apparaît donc que la notion la plus fondamentale de la mécanique quantique est l'information* et il est naturel qu'elle serve à des tentatives d'axiomatisation de la mécanique quantique. (Axiomatique quantique*). Les états quantiques représentent l'information quantique- la réalité de nos opérations de laboratoire, une information qui ne peut pas être décrite comme une suite de symboles classiques sur un ruban de Turing.

Mais ce n'est pas notre connaissance qui est visée mais la possibilité de connaissance inscrite dans la nature.

INFORMATION QUANTIQUE (Philosophie)

Le 1^{er} Janvier 1998 la Physique a pris acte d'une évolution qui la travaille en profondeur. La revue « Physical Review », le miroir de la physique mondiale, a institué une nouvelle rubrique. Dans la partie A, après « General physics », mais avant même « Atomic and molecular physics », est apparue une rubrique étrange, tant soit peu exotique : « Quantum information ». Information quantique.

La portée de cet évènement est considérable. Il adresse à la communauté scientifique une multitude de messages.

Tout d'abord il place en tête de la physique, avant la science atomique et moléculaire, une science nouvelle, proposée implicitement comme science modèle et idéal d'intelligibilité. Au règne de la mécanique classique se substitue celui la mécanique quantique qui impose à toute la physique sa démarche fondamentale d'étude de l'information à l'aide d'espaces mathématiques abstraits. Mais il ne s'agit pas d'une généralisation de la mécanique. C'est d'une généralisation de la théorie des probabilités qu'il s'agit. Adieu matière et énergie.

Ce faisant il concrétise une évolution historique qui voit dans les années 80 émerger des courants de pensée qui rapprochent fortement les concepts de la physique et les concepts de l'informatique*, plus précisément ceux de la théorie du calcul*. On assiste en fait à une invasion et à une contamination de la physique par la nébuleuse informationnelle.

Enfin il proclame la volonté de donner à l'information un statut physique en lui conférant une objectivité, tout comme le projet de « sémiophysique » s'efforce de donner au sens des fondements géométriques, topologiques ou dynamiques. Dans les deux cas il s'agit bien de dépasser l'opposition entre le subjectif et l'objectif au profit d'une objectivité généralisée. L'introduction de l'information en physique tout comme celle de la physique en sémiotique correspond à une volonté de tenir compte de l'esprit humain dans la connaissance scientifique par l'introduction d'un sujet (observateur) universel. C'est aussi l'ambition de la « biosémiotique* » qui se propose l'étude de la nature biologique des signes et des fondements sémiotiques de la biologie, en tentant d'établir des liens profonds entre information et signification.

La théorie de l'information quantique a puissamment fait rebondir le débat sur la nature ontique* ou épistémique* de l'état. Réalité ou connaissance de la réalité ? Un débat qui implique aussi toute la discussion autour des probabilités objectives et des probabilités bayésiennes. Un débat qui risque de se prolonger longtemps car l'objectivité est difficile à établir dans son cocon de réalisme métaphysique et la subjectivité se heurte à la délicate définition et description du sujet connaissant.

On assiste en réalité à une profonde modification de l'ontologie de la physique, accompagnée d'une réévaluation de son épistémologie.

Pour de nombreuses raisons, le savoir contemporain oppose de moins en moins le mode d'intelligibilité propre aux phénomènes naturels et le mode d'intelligibilité propre aux phénomènes humains. La promotion du terme de « quantum information » à l'avant scène de la physique traduit un double mouvement reflété par des slogans en vogue : « L'information est physique » et « La physique c'est l'information ». Traduisant en fait l'idéal d'objectivité des théories physiques malgré la nécessité où elles se trouvent d'inclure l'observateur ou les instruments de mesure. Est ce là cette objectivité dite « faible » par B. d'Espagnat, qui est plutôt une objectivité ultra-forte, qui dépasse toute réalité ontologique indépendante ?

INFORMATION (Théorie algorithmique) (Cf. Complexité aleatoire*)

INFORMATION THERMODYNAMIQUE ET CONSTRUCTION DES SYSTEMES BIOLOGIQUES

INFORME

INNE ET ACQUIS (Nature and nurture)

INSTABILITE

Lorsque le caractère d'un mouvement ou d'un état est profondément modifié par une infime perturbation, on dit que ce mouvement ou cet état sont instables.

L'instabilité étant le contraire de la stabilité*, on devrait examiner les différents types d'instabilité correspondant aux différents types de stabilité. On se bornera ici à considérer une instabilité générale.

L'instabilité est la source de graves difficultés dans l'application au mouvement des modèles idéaux sur lesquels est fondée une grande partie de la dynamique. Il va y avoir des discordances entre les observations réelles et les solutions mathématiques. Il est évident par exemple que l'on ne pourra observer un crayon se tenant plus ou moins longtemps sur sa pointe, quoiqu'il y ait une solution mathématique correspondant à cet état. La solution d'un système dynamique ne se réalise que si elle est stable. Les trajectoires fortement instables ne se réalisent pas.

L'instabilité a de nombreuses conséquences :

- 1) Un processus mécanique peut devenir irréversible si lui-même ou le processus inverse s'avère instable. Il semble en fait que l'instabilité soit une condition nécessaire mais non suffisante d'irréversibilité*.
- 2) Il faut réviser la notion fondamentale de système isolé*. Il n'y a pas dans la nature de système isolé de manière absolue.
- 3) Dans les systèmes instables il faut revoir la notion de cause* d'un phénomène. Dans une théorie dynamique tout résultat est la conséquence des équations du mouvement et des conditions initiales ; ces dernières sont ordinairement considérées comme les « causes » des résultats. Dans des processus instables une toute petite cause peut avoir de très grands effets. Dans ce cas

il est plus raisonnable de considérer comme cause non pas la perturbation mais l'instabilité elle-même. Un homme tout au bord d'un précipice peut tomber si quelqu'un lui fait peur par un cri ; il n'est pas raisonnable de considérer ce cri comme la cause de la chute plutôt que de dire que cette chute est due à l'instabilité de la position.

- 4) L'instabilité est la propriété grâce à laquelle la notion de probabilité apparait dans les systèmes dynamiques. En cas d'instabilité le sort d'un point* perd tout intérêt pratique, tout en ne cessant pas d'exister. La notion de point elle-même cesse d'être opérationnelle. Elle est en effet issue d'un passage à la limite pour un petit domaine, et n'a d'intérêt que si ce petit domaine maintient plus ou moins son aspect au cours du mouvement. Le point est alors l'image idéale du petit domaine comme système isolé et indéformable. Le point idéalise les propriétés des domaines stables. En cas d'instabilité il faut véritablement décrire les modifications (brutales) des domaines (si petits soient ils). La théorie de la mesure* et la théorie des probabilités* deviennent alors les instruments naturels pour décrire cette situation, au lieu des théories des transformations ponctuelles.
- 5) L'instabilité peut rendre problématique la détermination d'un état futur à partir d'un état initial, car il faut alors connaître l'état initial avec une grande précision pour déterminer véritablement l'état futur. Il apparait alors qu'il existe des situations (chaos déterministe*) où le désir de connaître l'état futur avec une précision modeste, 10^{-2} par exemple, se heurte à la nécessité de donner l'état initial avec une précision non inférieure à 10^{-20} et même 10^{-100} . Ces précisions ne sont pas du tout réalisables. Ce n'est pas notre incapacité expérimentale qui est la « cause » de cette situation c'est l'instabilité elle-même qui pose des barrières infranchissables. L'imprécision sur l'état initial entraîne une impossibilité de dire quoi que ce soit sur un futur plus ou moins éloigné. Plus précisément on sait seulement que le point de phase sera à l'intérieur d'un domaine qui peut n'être rien moins que l'espace de phase tout entier. Devant ce fait inattendu nous

pouvons essayer d'en apprendre un peu plus sur ce point de phase futur, en particulier sur sa probabilité de présence dans telle ou telle région de l'espace de phase. Là encore on se trouve en présence d'un fait inattendu. Pour un intervalle de temps suffisamment grand la distribution de probabilité de l'état ne dépend pas de la distribution de probabilité de l'état initial. Ceci se produit en fait à partir du moment où on ne peut plus calculer l'état futur. On a en fait là une situation où la décorrélation affecte la trajectoire instable (fonction pseudo-aléatoire*), entraînant la sensibilité aux conditions initiales, qui est plus causée par l'instabilité qu'elle n'en est la cause.

La science au XX^e siècle a cessé de ne considérer que les phénomènes stables et accordé une grande importance aux phénomènes instables de la dynamique non linéaire et du chaos*. Ceci a changé sa vision du monde.

INSTRUMENTALISME.

Attitude épistémologique affirmant que les théories scientifiques ne décrivent pas la réalité, à supposer même qu'elle existe, mais ne sont que des constructions permettant de regrouper et de prévoir les phénomènes, donc de décrire nos démarches expérimentales. Une théorie n'est qu'un instrument pour de bonnes prédictions. Elle n'est pas une carte. Elle n'est pas une explication*. Les termes* de la théorie ne sont pas des objets physiques réels, même s'ils en ont l'apparence. Toute interprétation réaliste des termes théoriques* est écartée en vertu de la thèse de sous-détermination de Duhem-Quine*, selon laquelle aucun terme théorique ne peut être déterminé d'une manière unique par les données empiriques.

L'instrumentalisme s'oppose au réalisme scientifique* qui voudrait qu'une théorie fournisse aussi des explications* et des images du monde*. Les instrumentalistes adoptent une attitude nominaliste* au sujet des termes théoriques*. Ce qui désigne des non observables* ne réfère à rien dans la réalité, mais se trouve être simplement une construction logique à partir d'observables*. Au nom de l'instrumentalisme, Berkeley considérait que les forces dans la mécanique de Newton étaient analogues aux épicycles de Ptolémée, et Mach* ne croyait pas à la réalité des atomes et des molécules.

L'emploi de la M.Q. par la plupart des physiciens suppose une attitude instrumentaliste que l'existence de multiples interprétations* ne fait paradoxalement que révéler. Les divers formalismes mathématiques mis en jeu dans les présentations de la M.Q. sont autant de méthodes d'analyse qui sont le fait du théoricien et non pas le fait de la nature. Hélas !

Tout se passe "comme si" et non pas "comme ça". Les théories ne sont que des simulacres, à statut pragmatique*. Le "Comme si" est le seul "Comme ça". Sous l'influence de Mach* sans doute, c'est ce qu'a pu penser Einstein*.

INTEGRABILITE

L'intégrabilité d'une équation différentielle* ou d'un système dynamique* signifie que la courbe* solution de cette équation ou de ce système possède une équation analytique explicite. On parle de non intégrabilité lorsque l'équation analytique de la courbe solution n'est pas explicitable. L'intégrabilité d'un système différentiel signifie que la solution peut être représentée sous forme analytique* à l'aide d'un ensemble donné à priori de fonctions, pouvant comporter des fonctions spéciales*. La non intégrabilité est une propriété fondamentale qui ne peut être contournée en enrichissant le domaine des fonctions de représentation.

L'intégrabilité suppose que lorsque deux points de deux courbes d'une famille de solutions sont voisins les deux courbes restent voisines dans leur proximité. La non intégrabilité entraîne que les voisinages de deux points voisins de deux courbes peuvent différer profondément. L'existence d'une telle non intégrabilité est la source de la « sensibilité aux conditions initiales » qui mène au chaos* dans les systèmes dynamiques*.

La présence d'un terme non-linéaire* est une condition nécessaire (mais pas suffisante) de non-intégrabilité d'un système dynamique. En fait un système est intégrable s'il possède une loi de conservation* d'une grandeur physique pour chacun de ses degrés de liberté. Poincaré* a montré que le problème de trois corps en interaction gravitationnelle n'est pas intégrable.

INTEGRALE

En un sens le problème mathématique de l'intégrale d'une fonction est le problème inverse de la dérivation.

Etant donnée une fonction trouver non pas sa dérivée mais sa primitive, la fonction dont elle est la dérivée. Toutes les fonctions n'ont pas une primitive, disons que c'est seulement le cas pour les « bonnes fonctions ». La primitive s'interprète simplement selon Newton*-Leibniz* comme la fonction qui permet de calculer la surface du trapèze curviligne défini par la fonction entre ses valeurs aux points x_1 et x_2 . Cette surface est la différence des primitives en ces deux points.

La mesure* de ce domaine (surface) peut aussi être considérée comme la somme infinie des mesures de petits rectangles s'inscrivant sous la courbe. C'est l'intégrale de la fonction entre les deux variables considérées. La théorie de cette somme infinie est l'objet de la théorie de la mesure * en mathématiques.

Si la dérivée exprime un phénomène local, l'intégrale exprime un phénomène global. La vitesse d'un point est la dérivée de la trajectoire, alors que la distance parcourue en est l'intégrale.

INTEGRALE DE CHEMIN

INTELLIGENCE

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intelligence artificielle (IA) est une discipline scientifique née de la rencontre entre cybernétique* et informatique*. Elle est issue de questions liées d'une part à la possibilité de construire des « machines à penser » et d'autre part à la comparaison du cerveau humain avec les ordinateurs. La naissance de l'IA a été ainsi plus ou moins influencée par différents travaux, notamment par ceux de Mac Culloch et Pitts qui, inspirés par la neurophysiologie, proposaient les tous premiers modèles de réseaux de neurones* artificiels, et par ceux de Wiener* sur la cybernétique (science centrée sur l'étude des mécanismes de communication et de contrôle des machines et des êtres vivants), de Shannon *en théorie de l'information*, de Von Neumann sur l'architecture des calculateurs, et de Turing sur les fonctions calculables* par machine.

Les ordinateurs peuvent être doués d'une intelligence* syntaxique, de par leur puissance calculatoire capable d'explorer de gigantesques espaces combinatoires. C'est ainsi que l'on a construit des programmes capables de jouer aux échecs. En 1997 l'ordinateur « Deep Blue » est venu à bout du champion du monde Gary Kasparov. A condition de lui spécifier algorithmiquement toute sorte de démarches l'ordinateur peut s'avérer un outil puissant. La

constitution de systèmes experts ou le traitement de texte en sont des exemples. Le problème essentiel réside dans la compréhension analytique des situations que l'on veut gérer et dans leur formulation algorithmique.

L'ordinateur peut ainsi représenter l'information et acquérir des connaissances, résoudre des problèmes généraux, gérer des systèmes multi-agents et une intelligence collective, formaliser et mécaniser différents types de raisonnement, évaluer des situations, décider, planifier, raisonner sur le changement, le temps et l'espace, résumer, apprendre, découvrir, traduire automatiquement d'une langue dans une autre, créer des réalités virtuelles, Manipuler des systèmes symboliques, gérer le comportement de robots.

L'intelligence artificielle sémantique, où l'ordinateur donnerait lui-même sens à ses résultats, reste un rêve lointain. La machine travaille, mais l'homme interprète et décide. L'intelligence se ramène-t-elle à de simples calculs ? Il y a là un réductionnisme* trop caricatural.

L'ordinateur et l'intelligence artificielle algorithmique sont la conséquence naturelle du mouvement des idées scientifiques au XX^e siècle. Le XX^e ème siècle est dominé par deux corporations, les logiciens et les radioélectriciens (la TSF)

Logique*, positivisme logique*, structuralisme*, linguistique structurale*, un même combat pour l'algorithmisation et l'algèbrisation du discours. Avec des échecs retentissants comme les théorèmes d'incomplétude de Gödel*, l'effondrement du positivisme logique* en philosophie des sciences, la faillite de la bourbakisation* des mathématiques et de l'enseignement des mathématiques modernes. Avec néanmoins, grâce à la complicité des électroniciens, une immense réussite: l'ordinateur* (computer).

Tout le monde s'y est engouffré et l'ordinateur est naturellement devenu un modèle pour le monde, comme l'horloge aux XVII et XVIII èmes siècles. Le résultat a été toute une culture logique (dont l'Intelligence artificielle n'est qu'un rameau, fertile d'ailleurs). Tout ceci est très positif et on ne peut quand même reprocher à Turing* ou à Chomsky* de ne pas connaître la théorie des systèmes dynamiques* non linéaires. Les limitations de l'intelligence artificielle sont celle du positivisme logique , qui consiste à ne pas tenir compte du contexte. Une limitation que cherche à dépasser la robotique*.

Vers les années 70 le paysage intellectuel change. La corporation secrète des radioélectriciens, qui entre temps s'est adjointe la corporation secrète de la régulation automatique (bien souvent militaire), obtient un succès majeur: le laser*. Pensez donc,

l'émergence d'un ordre parfait, d'une cohérence idéale à partir du désordre. Voici l'autoscillateur* et l'autoorganisation*. Haken* (synergétique*) et Prigogine* (thermodynamique hors d'équilibre*) occupent le devant de la scène intellectuelle et l'image du monde change , d'autant plus que les travaux de l'école soviétique des systèmes dynamiques* commencent à être connus.

Les sciences cognitives s'adressent naturellement à ces nouveaux modèles. Il faudrait montrer comment de nouvelles recherches digèrent progressivement ce changement de culture.

INTELLIGENCE EN ESSAIM (Swarm intelligence)

INTELLIGIBILITE

INTENTIONNALITE

Le concept d'intentionnalité était à l'origine utilisé par les philosophes scholastiques* médiévaux. Il a été réintroduit dans la philosophie européenne par Franz Brentano* au XIX^e siècle. Ce concept reflète la propriété qu'a l'esprit d'être dirigé vers les choses, de s'adresser aux objets et aux situations du monde. Une attitude active du cerveau qui ne se borne pas à une activité réceptive. Le concept d'intentionnalité se distingue de celui de représentation*. Consciente ou inconsciente, l'intentionnalité n'est pas l'intention d'effectuer tel ou tel acte.

L'intentionnalité joue un rôle essentiel dans la phénoménologie transcendantale* de Husserl*. L'intentionnalité nomme la conscience en acte, comme conscience « de », souvenir « de », imagination « de », désir « de », etc., selon le rapport qui constitue la conscience en une corrélation à ses objets de conscience. Le naturalisme* n'a pas idée de l'intentionnalité, il ne veut rien en savoir et pourtant, ingrat, il la présuppose toujours, il est porté par elle. Il faut bien, en effet, qu'un monde soit là pour moi, qu'un monde se soit toujours déjà ouvert à moi, pour qu'ensuite je puisse aller y étudier le système corrélatif des causes et des effets. La philosophie comme phénoménologie sera science de l'intentionnalité et à ce titre, elle sera science en un sens plus radical que les sciences de la nature, car science du sol qui les porte, science de l'origine de notre rapport au réel

INTERACTION

Influence exercée d'un corps à un autre par l'intermédiaire d'un milieu ou d'un maillon intermédiaire, la transmettant de point en point avec une vitesse finie. Contrairement à l'interaction à distance* il s'agit là d'une interaction de proche en proche pour laquelle a été créé la notion de champ*.

INTERACTION D'ÉCHANGE

Influence réciproque de deux particules identiques, caractéristique de la mécanique quantique.

En mécanique quantique deux particules identiques perdent leur individualité (principe d'indiscernabilité*) et sont en quelque sorte échangeables (symétrie de l'état*). Cet échange de particules indiscernables* s'exprime par l'existence d'un état enchevêtré*. A cet échange correspond une interaction nouvelle, dite interaction d'échange. Elle interdit en particulier le rapprochement de deux fermions dans le même état et s'affaiblit avec la distance. Pour les électrons, c'est la conséquence du principe d'exclusion de Pauli*, qui maintient les électrons à distance. Elle affaiblit ainsi la répulsion électrostatique entre fermions dans un même édifice et contribue donc à le stabiliser, et ce dès le plus simple d'entre eux, la molécule en d'hydrogène H_2 . L'interaction d'échange est la principale responsable de l'établissement des liaisons chimiques* et de la stabilité de la matière.

INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

Une des interactions fondamentales entre particules élémentaires résultant de l'existence de charges électriques* et de moments magnétiques*, s'exerçant par l'intermédiaire du champ électromagnétique*.

D'un point de vue quantique, interaction par l'échange de photons* virtuels.

Elle détermine les forces entre les noyaux* et les électrons* dans les atomes* et les molécules*, elle est responsable de l'émission et de l'absorption d'ondes électromagnétiques par les particules chargées.

INTERACTION FAIBLE

Une des interactions fondamentales à laquelle participent toutes les particules élémentaires* sauf le photon*. Elle conditionne toutes les

désintégrations de faible intensité des particules élémentaires et l'interaction du neutrino* avec la matière. La désintégration nucléaire radioactive* (désintégration β) du type de celle observée par Becquerel en 1896 est le type même des interactions faibles.

Lors des interactions faibles la parité* (symétrie miroir) et la symétrie lors du renversement du temps (Cf. Invariance CPT*) sont violées. Cette interaction provoque l'apparition de bosons intermédiaires*.

C'est dans le cas de l'interaction faible que la théorie des champs de jauge* prend toute sa signification. En particulier dans la formulation d'une théorie unitaire entre l'interaction faible et l'interaction électromagnétique : la théorie électrofaible*.

INTERACTION FORTE

C'est l'interaction la plus forte de toutes celles qui s'exercent entre particules élémentaires. Elle dépasse de cent fois l'interaction électromagnétique. Elle s'exerce entre les hadrons*. Elle est à courte portée contrairement aux interactions électromagnétique et gravitationnelle.

Dans la matière ordinaire cette interaction entre nucléons (protons et neutrons) est responsable de la stabilité des noyaux atomiques. Mais lors de la collision à grande énergie de noyaux ou de nucléons, l'interaction forte est responsable d'une multiplicité de réactions nucléaires, comme la désintégration des noyaux ou la transformation d'un noyau dans un autre.

Un rôle particulièrement important est joué dans la nature par la réaction de fusion où quatre nucléons se réunissent en un noyau d'hélium. Cette réaction se produit dans le Soleil et s'avère la principale source de l'énergie utilisée sur la Terre.

INTERACTION GRAVITATIONNELLE

INTERACTIONS MOLECULAIRES

INTERFERENCE DES ONDES

Lorsqu'un dispositif physique sépare une onde en deux parties et qu'après des parcours qui peuvent différer en longueur ces deux parties sont superposées (principe de superposition*), on obtient en général une figure périodique de répartition de l'énergie. Des zones de maximum d'énergie et des zones d'énergie faible, voire même nulle, apparaissent. Ce phénomène est dû à ce que lors de la superposition,

les vibrations constitutives des ondes peuvent se trouver en phase* ou en opposition de phase, par suite de la différence de distances parcourues par les deux parties de l'onde initiale.

Dans le cas de la lumière* on obtient des zones alternées d'éclairement qui constituent de belles images périodiques. Des dispositifs aussi simples que deux trous dans une plaque (trous d'Young) ou des systèmes de miroirs et de lame semi-réfléchissante (interféromètre de Michelson) permettent d'étudier ces images. Historiquement ce sont les trous d'Young qui ont permis à Young* et à Fresnel* d'établir le comportement ondulatoire de la lumière.

Les particules élémentaires (électron, neutron) donnent des figures d'interférence. L'expérience des trous d'Young n'a été réalisée qu'en 1954, ce qui n'a pas empêché de la présenter dans tous les manuels jusqu'alors. La seule expérience d'optique réalisée n'était alors que celle de la diffraction* des électrons par un cristal due à Davisson et Germer en 1927, confirmant l'hypothèse de l'onde* de de Broglie*.

Les interférences font partie des expériences cruciales* de la physique.

INTERFERENCE DES ELECTRONS

En 1954 Jean Faget a réalisé pour la première fois avec des électrons une expérience d'interférence due à des trous d'Young. A la différence de la diffraction des électrons*, leur interférence découle directement de l'interférence des états* en mécanique quantique.

Lorsqu'il a été possible de détecter les photons et les électrons individuellement, on a pu aussi montrer qu'il n'y a pas besoin d'une assemblée de particules pour faire des interférences : lorsqu'elles arrivent une par une, il y a également interférences. Cela permet de confirmer la célèbre affirmation de Dirac « chaque photon interfère seulement avec lui même » et l'expérience de pensée décrite par Feynman dans ses célèbres cours, où il se posait la question de savoir si la figure d'interférence apparaîtrait même si les électrons arrivaient les uns après les autres devant deux fentes.

C'est en 1989 qu'une équipe de chercheurs de Hitachi (fabricant de microscopes électroniques) réussit à contrôler la production d'électrons et la détection *un à un* et à observer l'apparition *dans le temps, électron après électron* de la figure d'interférences. L'équipe d'Hitachi peut affirmer que, dans leur expérience, les électrons sont passés *un à un* comme indiqué dans l'expérience de pensée de

Feynman. Ce que l'on observe est que les impacts successifs forment petit à petit les franges d'interférence.

Il y'a là un double langage pour exprimer le dualisme onde corpuscule*. Un langage physique d'interférence des ondes. Le langage de l'onde de de Broglie associée à l'électron, une onde qui disparaît lorsque l'on détecte l'électron comme une réalité ponctuelle. Un langage abstrait. Le langage probabiliste qui consiste à superposer des états possibles et non pas des possibilités (probabilités quantiques*), et où la certitude apportée par une détection de l'électron provoque une décohérence*. Chacun des langages est un simulacre* de l'autre.

INTERFERENCE DES ETATS en M.Q.

Lors de la superposition des états* en M.Q., la corrélation de phase entre états (vecteurs*) conduit à des phénomènes d'interférence*, en tous points analogues à ceux produits par des ondes qui satisfont au principe de superposition*.

De là les beaux phénomènes d'interférence observés pour les électrons , les atomes et les molécules jusqu'à C₆₀ (fullerène). Expression indubitable de l'existence du dualisme onde-corpuscule*.

INTERNET

Réseau informatique mondial constitué d'un ensemble de réseaux nationaux, régionaux et privés qui sont reliés par le protocole de communication TCP/IP et qui coopèrent dans le but d'offrir une interface unique à leurs utilisateurs. L'ambition d'Internet s'exprime en une phrase : relier entre eux tous les ordinateurs du monde. A l'image du téléphone qui permet de converser avec toute personne dont on connaît le numéro, Internet est un système mondial d'échange de documents électroniques : textes, fichiers, images, sons et séquences audiovisuelles. C'est l'alliance de l'informatique et des télécommunications : la télématique au véritable sens du terme. Les utilisateurs d'Internet sont désignés par le terme d'internautes, synonyme de cybernaute, de surfer ou de net surfer. Quant aux informations du réseau, elles sont accessibles à partir de "lieux" que l'on appelle les sites Internet. Issu de réalisations militaires et scientifiques, c'est dans les années 90 qu'Internet s'est imposé au grand public par la grâce d'un système de consultation aisé : le World Wide Web (WWW). Le grand public s'empare du Net. Les systèmes de

recherche font leur apparition, notamment le désormais célèbre Google.

Internet met à la disposition du public une connaissance quasi-universelle. Quel nouvel univers en résultera-t-il ?

INTERPRETATION

Ensemble variable des conclusions tirées d'un fait.

Ensemble des valeurs ou des significations que l'on peut attribuer aux éléments d'un discours ou d'une doctrine ou d'une théorie* (expressions, formules, symboles). L'interprétation joue un rôle considérable dans la théorie de la connaissance car elle régule le rapport entre les formalismes et le monde objectif.

L'interprétation est génératrice de sens. L'interprétation génère du sens en ce qu'elle enchaîne un discours nouveau sur un discours ancien. Cet enchaînement dénonce dans la constitution même du discours ancien une capacité originelle de reprise qui est son caractère ouvert. L'interprétation est l'aboutissement concret de cet enchaînement et de cette reprise.

Une théorie n'a pas forcément besoin d'interprétation. Une théorie ne doit pas faire référence directe à la réalité pour assurer son succès ou la précision de ses prédictions. La théorie des probabilités en est un exemple car cette théorie indique la manière de raisonner au mieux à la lumière des informations que l'on possède quelle qu'en soit l'origine.

INTERPRETATION PHYSIQUE.

L'interprétation physique d'un fait ou d'une théorie consiste en la production d'une image physique correspondante. Cette image a en général pour fonction de révéler des relations de cause à « effet ».

L'interprétation prend deux aspects selon qu'elle fournit une explication* ou donne un statut physique au formalisme lui-même. Quand on ne trouve pas d'explication au moyens d'images préexistantes, fournissant une relation de cause à effet, on en est « réduit » à accepter le discours comme réalité ultime. C'est ce que fait la théorie de la relativité restreinte en postulant la constance de la vitesse de la lumière, et en renonçant à toute théorie d'éther. C'est ce que fait l'interprétation de Copenhague* de la mécanique quantique en considérant la fonction d'onde comme une réalité physique.

INTERPRETATION DE COPENHAGUE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE.

Interprétation standard probabiliste a minima de la Mécanique Quantique selon laquelle le formalisme de cette théorie fournit une description des phénomènes microphysiques littéralement vraie et en principe complète. La fonction d'onde est objective et caractérise l'objet microscopique. C'est une interprétation réaliste sans interprétation. Le formalisme quantique représente toute la réalité de nos observations expérimentales. C'est un instrumentalisme* et un épistémisme*.

En fait l'interprétation de Copenhague oscille entre les deux aspects de la mimésis, et a du mal, comme la plupart des physiciens a renoncer à un point de vue réaliste.

On postule que toute mesure provoque une interruption discontinue dans l'évolution de l'état, l'effondrement de la fonction d'onde*, dont la nature n'est pas expliquée, laissant dans le vague la définition de la mesure. Bohr s'en tenait aux principes du positivisme* qui implique que seules les questions liées aux observations soient discutées scientifiquement.

Il n'y a rien à voir au delà. " Circulez!". « Taisez vous et calculez ». C'est « l'agnosticisme* copenhaguien ». Il n'y a pas de monde subquantique* La Mécanique Quantique rend compte exhaustivement des possibilités expérimentales et n'a pas besoin d'interprétation*. La seule interprétation est de ne pas chercher à ouvrir de boîte noire*(en particulier la boîte noire de la mesure) et de maintenir une séparation stricte entre microscopique et macroscopique. Cette dernière hypothèse pose bien des problèmes.

Les prédictions statistiques concernent le système unique, en utilisant la théorie des probabilités subjectives*.

Einstein*, Schrödinger et de Broglie se sont à maintes reprises élevés contre l'interprétation de Copenhague.

INTERPRETATION DE DE BROGLIE-BOHM DE LA MECANIQUE QUANTIQUE.

Une interprétation typique, qui consiste en un changement de boîte noire. Toute la mécanique quantique peut être interprétée par un modèle où les particules possèdent position, moment et trajectoire à condition d'introduire au lieu des potentiels classiques un « potentiel quantique » calculé au moyen de la fonction d'onde. Toute l'étrangeté quantique est aspirée dans ce potentiel construit ad hoc et dont rien ne

manifeste directement la présence physique. Cette interprétation permet d'obtenir de belles images de trajectoires trompeusement suggestives. Elle a souvent joué le rôle de montrer qu'une théorie à variables cachées* est possible, à condition d'y inclure un élément non local* (le potentiel quantique).

INTERPRETATION ENSEMBLISTE DE BALLENTINE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

Dans l'interprétation standard de la M.Q. l'objet quantique est un objet unique. La probabilité* qui lui est associée est une propensité*.

Dans une interprétation logique soutenue par Einstein*, par Popper*, par Blokhintsev* dans le livre où des générations d'étudiants soviétiques ont appris la M.Q. et Ballentine*, le discours de la M.Q. ne concerne pas un système unique mais un ensemble statistique* conceptuel de systèmes préparés de la même manière. La M.Q. est une théorie statistique d'un ensemble d'objets quantiques. C'est une interprétation de la probabilité comme fréquence. L'état* prend là un semblant de signification physique. Mais c'est un tour de passe-passe

Cette interprétation fournit les mêmes résultats que l'interprétation standard mais en levant un certain nombre de paradoxes. Elle ne change rien au brouillard de l'ontologie de l'objet quantique unique.

INTERPRETATION D'EVERETT-WHEELER DE LA MECANIQUE QUANTIQUE THEORIE DES UNIVERS MULTIPLES.

INTERPRETATIONS DE LA MECANIQUE QUANTIQUE.

Bien que tous les chercheurs s'accordent sur la façon d'utiliser la mécanique quantique dans des problèmes concrets, ils ne s'entendent pas sur la manière d'interpréter la théorie. A quel type d'objets se rapportent précisément les symboles du formalisme ? Comment comprendre certaines corrélations, inexplicables par le recours à une cause commune, entre des objets microscopiques séparés depuis longtemps (par rapport aux intervalles de temps caractéristiques des processus atomiques) ? Et comment rendre compte, par le formalisme de la mécanique quantique, de la mesure d'une quantité microscopique ? Quatre-vingts ans après le développement de la

théorie, on comprend certes un peu mieux chacune de ces questions, mais on n'a de réponse définitive à aucune.

La formulation de la M.Q. est fondée sur un certain nombre d'axiomes abstraits dont l'existence n'a pas de motivations claires. Le problème posé par la M.Q. n'est pas tant celui de son effectivité mais celui de son interprétation. On doit alors faire face aux problèmes d'une définition précise du réalisme*, de la complétude, du réalisme local* et du déterminisme*.

La M.Q. est un modèle mathématique décrivant le comportement des objets quantiques*. Comme tout modèle physique il représente les états*, les observables*, les mesures et la dynamique (évolution des états). L'état physique d'un système est un objet mathématique qui représente la connaissance que l'on en a, qui permet de calculer toutes les quantités mesurables.

En ce qui concerne les observables l'interprétation courante est instrumentaliste*L'interprétation instrumentaliste rejette la notion de réalité sous jacente et essaye d'interpréter la M.Q. en termes d'opérations du laboratoire : préparations, manipulations, mesures.

Il y a deux grands types d'interprétation* de la mécanique quantique selon l'interprétation de l'état : une interprétation réaliste* où la mécanique quantique décrirait physiquement les processus de la microphysique et une interprétation épistémique* selon laquelle la mécanique quantique permettrait seulement de calculer des prévisions sur les observables*. La nature ou le comportement.

Dans l'interprétation épistémique et instrumentaliste* on ne doit pas avoir recours à un discours chosifiant. Il n'y a en fait ni photon, ni particule, ni boson, ni fermion, ni champ, ni spin, ni quoi que ce soit. Il n'y a aucun attribut. Il n'y a aucune ontologie*. Il y'a simplement des recettes pour calculer ce que l'on observe lors des manipulations de laboratoire. Point à la ligne.

Les problèmes d'interprétation de l'état ont pour origine l'élargissement de la notion d'état en M.Q. de par l'apparition d'états non classiques (superposition d'états*).

Dans l'interprétation réaliste la M.Q. décrit la réalité microscopique de la même manière que la mécanique classique décrit la réalité macroscopique. Elle décrit une magie quantique*. Ainsi par exemple chez Vladimir Fock la fonction d'onde représente les possibilités objectives d'observation des valeurs mesurées des observables. La potentia aristotélicienne.

Dans l'interprétation épistémique, l'état correspond à une procédure de préparation* et les observables correspondent à des procédures de mesure sur un objet microscopique grâce à un

instrument macroscopique. C'est une approche cybernétique. L'objet microscopique s'efface au profit d'une boîte noire*. La M.Q. ne décrit pas un objet microscopique en lui-même ; ceci nécessiterait une autre théorie.

L'interprétation de Copenhague est une interprétation instrumentaliste* nostalgique d'une interprétation réaliste car elle affirme que l'état représente toute la réalité physique. La fonction d'onde* est une représentation correcte et complète d'un objet quantique unique.

L'interprétation épistémique affirme que l'état représente notre connaissance du système et non pas la réalité physique sous jacente..

Devant les difficultés d'une interprétation réaliste de nombreux physiciens s'en tiennent à une interprétation instrumentaliste, à l'intérieur de laquelle apparaissent de nombreuses tentatives de donner une réinterprétation (réalisation physique) du modèle*.

Pour l'interprétation épistémique, toutes les présuppositions ontologiques réalistes sont étrangères à la théorie quantique qui est en soi une pure épistémologie. C'est là une position idéaliste*. La théorie quantique comme théorie d'information* doit être débarrassée des présupposés réalistes qui ne doivent leur existence qu'aux préjugés et croyances individuelles des physiciens. La théorie quantique ne décrit pas la réalité physique. Elle fournit un algorithme pour calculer les probabilités d'évènements macroscopiques, comme les « clics » des détecteurs, conséquences de nos interventions expérimentales.

En fait les réalistes défendent une position matérialiste* qui ne peut se résoudre à l'abstraction mathématique et cherche à construire des images forcément classiques et par là même paradoxales. Les superpositions d'états* et les états enchevêtrés prennent un aspect magique pour de nombreux physiciens expérimentateurs. En fait la plupart de ces physiciens ont une vision réaliste du monde et considèrent les états quantiques comme des objets physiques.

Pour les épistémistes, l'observable* en M.Q. ne prend sens qu'à travers un instrument et une mesure*. Elle n'est pas un attribut du système. La M.Q. est un discours sur la connaissance des observables. L'état représente cette connaissance. La M.Q. ne connaît que les modifications de cette connaissance. Elle donne les règles du changement d'état mais pas le mécanisme. Chercher un mécanisme pour le changement d'état signifie sortir de la M.Q..

Si l'on admet que la Mécanique Quantique est construite comme une Boîte Noire* contenant toute la partie microscopique du système étudié (préparation* et mesure* comprises) et décrite par un appareil

mathématique bien déterminé, on peut expliquer ce que signifie l'existence de plusieurs "interprétations" de la Mécanique Quantique. C'est le reflet du caractère instrumentaliste* de la mécanique quantique.

Tout comme en Cybernétique*, à une même situation physique d'entrées-sorties, peuvent correspondre différentes formulations mathématiques pour la Boîte Noire*. C'est là une manifestation de la thèse de Duhem-Quine* sur la non unicité du modèle mathématique correspondant à un jeu de données expérimentales. Les faits expérimentaux ne suffisent pas pour établir le "Comme ça" et ne déterminent que des "Comme si". Une même boîte noire peut par ailleurs s'appliquer à différentes situations physiques qui sont les exemples concrets d'un même modèle abstrait.

Les différentes interprétations de la Mécanique Quantique apparaissent effectivement comme des tentatives d'interprétations physiques* différentes des différents formalismes mathématiques proposés pour la formulation de la Mécanique Quantique.

Le physicien est constamment tenté de donner à une nouvelle formulation mathématique de la théorie une interprétation ontologique réaliste. Il hypostasie* certains objets mathématiques auxquels il donne un statut d'objets réels. Ce faisant il cherche à ouvrir la Boîte Noire, succombant à un phantasme physicaliste* qui voudrait à tout prix ignorer le caractère de simulacre* de la théorie.

L'interprétation de Copenhague* consiste précisément à affirmer qu'il n'y a pas d'autre interprétation de la Boîte Noire que d'être une Boîte Noire. On peut bien sûr construire différentes Boîtes Noires, mais cela ne constitue pas différentes interprétations physiques de la situation. On ne peut les distinguer par des expériences. A moins que l'on décide que l'on a à faire à des théories différentes de la Mécanique Quantique et que l'on cherche à produire des données expérimentales nouvelles justifiant cette attitude. De telles théories sont alors dites, théories alternatives. Il en a été proposé quelques unes (Onde pilote* de Louis de Broglie, Electrodynamique Stochastique*) mais elles n'ont pas pour l'instant obtenus de succès décisifs.

Il faut alors considérer les différentes interprétations comme les facettes multiples d'une même théorie*, sans que cette multiplicité révèle nécessairement le "Comme ça" de la microphysique. Ces interprétations font partie d'une classe de modèles dans une interprétation sémantique de la théorie* quantique. Aucune des nombreuses présentations de la Mécanique Quantique n'est d'ailleurs indiscutable. Plutôt que d'interprétations ou de formulations il vaudrait mieux parler d'avatars de la M.Q., tout en sachant que

l'équivalence entre les différents avatars est loin d'être complète et qu'il n'existe pas de faits expérimentaux permettant de les distinguer.

Le raton laveur* propose au lecteur sa vision de l'interprétation ordinaire de la mécanique quantique, dite interprétation de Copenhague*. C'est l'interprétation de la mécanique quantique par le raton laveur*.

A titre illustratif, sans qu'il s'agisse d'un inventaire, citons, pour convaincre le lecteur de la multiplicité des avatars de la Mécanique Quantique:

La théorie de de Broglie-Bohm*

La théorie stochastique de Nelson

La théorie de l'intégrale de Feynman

La théorie modale de Dieks

La théorie des univers multiples d'Everett-Wheeler*

La théorie des histoires consistantes

La théorie transactionnelle.

Les théories axiomatiques* (Logiques propositionnelles*, C*-algèbres...)

A ce jour, il y a toujours débat entre les physiciens sur l'interprétation physique de la fonction d'onde*, sur le contenu microphysique des concepts de coordonnée et d'impulsion d'une particule ou sur le contenu physique du processus de mesure*.

Il y a pourtant accord général sur trois points:

la mesure* crée l'observable

la fonction d'onde permet de calculer correctement les distributions de probabilité des résultats des mesures de toute grandeur physique

la mesure* change en général l'état*

INTERPRETATION DE LA MECANIQUE QUANTIQUE PAR LE RATON LAVEUR*

Le raton laveur est instrumentaliste*.

Un objet quantique* (microphysique) étant donné, le physicien veut absolument lui arracher des vérités classiques, à l'aide de ce qu'il appelle la mesure*. Il veut voir jusqu'à où il peut tenir ce langage classique sur une réalité dont l'ontologie* lui échappe. Les variables classiques sont des concepts à priori indépendants, préalables à toute

observation, ce sont les phénomènes qui les lient. La mécanique quantique habille de force l'objet quantique de vêtements classiques qui lui vont mal. Elle appelle cela une mesure*. Mais ce procédé contre nature ne peut se pratiquer simultanément sur certains couples d'observables comme la position et le moment. Ce forcing expérimental s'entête alors, pour se démarquer du classique, à ne pas vouloir considérer ensemble indépendamment certains concepts classiques complémentaires, comme la particule* et l'onde*, la position et le moment. Il n'y a pas de particule sans onde associée et il n'y a pas d'onde indépendante de la particule. Toute tentative d'isoler la particule comme un vrai corpuscule fait disparaître le comportement quantique, l'onde s'évanouit. On a bien essayé de produire des modèles liant corpuscule et onde. En vain. C'est là tout le problème auquel la mécanique quantique fait vaillamment face avec son formalisme mathématique.

C'est ce principe de complémentarité* qui va régir une mécanique étrange, où l'objet se trouve dans une boîte noire* et où l'information observable est liée à des règles strictes d'exclusion. Vous voulez des grandeurs classiques, vous en aurez, mais elles ne seront pas indépendantes, pire encore elles vont fluctuer. Monsieur Heisenberg* l'a dit, ces fluctuations ne sont pas indépendantes. Si une observable macroscopique se précise l'autre devient floue. On se débarrasse par là même du problème de la mesure conjointe de la position et du moment. Toute l'information sur le moment est contenue dans l'information sur la position. Monsieur Fourier* est passé par là. Ils appellent cela le dualisme onde-corpuscule*. Essayez donc de vous débarrasser du hasard*. Quant au repos absolu il n'existe pas.

Hasard étrange que ne régit pas le calcul des probabilité* de nos cours de probabilité. La nique à Monsieur Kolmogorov* qui croyait par sa fameuse axiomatique couvrir tout le champ du hasard. La mécanique quantique n'est pas une mécanique, mais une doctrine des fluctuations de grandeurs classiques que l'on impose à l'objet quantique. Il y'a là un bruit quantique* des observables. Quoi d'étonnant à ce qu'un nouveau calcul de probabilité apparaisse. La probabilité de deux situations possibles indépendantes n'est plus la somme des probabilités, mais se calcule au moyen de la somme des deux états* correspondant à ces situations. Dans l'expérience des trous d'Young avec des particules classiques les probabilités de passage dans chaque trou s'ajoutent ; pour des particules quantiques ce sont les états des particules dans chaque trou qui s'ajoutent. Résultat de l'addition des états, des phénomènes d'interférence*, car les états sont des vecteurs* !. Monsieur Born* l'a dit, les probabilités sont dans les

états, les états sont une connaissance qui permet de calculer les probabilités. Mais les états sont des nombres complexes* autant dire des vecteurs, ce qui introduit un facteur de phase*. Monsieur de Broglie* est content, il y a bien là une onde mystérieuse qui donne des interférences. L'ennui c'est que la mécanique quantique ne connaît pas l'onde de de Broglie, qui appartient à la boîte noire, que seul l'état représente. Voilà bien un coup d'état. Tout est dans l'état. Vous voulez un état, adressez vous à Monsieur Schrödinger et résolvez son équation, qui fournit des fonctions d'onde (fonctions complexes) mais non des ondes. Autant escalader le Mont Everest. D'autant plus que chaque fois que l'on fait une mesure, l'état change de manière imprévisible, au lieu d'évoluer selon Schrödinger. Allez y comprendre quelque chose. Qu'est ce que c'est que cette mesure qui n'est pas définie par un appareil expérimental précis ? Le mot mesure n'a pas le même sens en classique et en quantique !

La mécanique quantique, malgré les limitations des ambitions du physicien, est, sans doute grâce à ces limitations, d'une très grande cohérence. Une cohérence inscrite au sein d'un formalisme mathématique abstrait dû à Dirac* et Von Neumann*. Les deux faits expérimentaux majeurs de la microphysique*, quantification* et interférences* se trouvent représentés par un formalisme unique où jouent un espace vectoriel* (états) et ses opérateurs* (observables*). Une cohérence au service de l'accord parfait avec les résultats des expériences. Tant pis pour ceux qui cherchaient à la mettre en défaut en imaginant des variables cachées*. Tout le monde voudrait bien ouvrir la boîte noire pour savoir ce qu'il y a au-delà de cette mascarade classique. Mais boîte noire elle est, et sans doute le restera-t-elle longtemps.

C'est ce que pense l'interprétation de Copenhague* et ne démentent pas les autres interprétations* de la mécanique quantique, malgré leurs aspects hérétiques ou exotiques.

Satisfait de lui, le raton laveur a voulu résumer ses connaissances sur la mécanique quantique et a écrit ce texte pour un dictionnaire :

Il faut rappeler que la théorie quantique adopte vis-à-vis du monde microscopique une attitude très différente de la physique habituelle. L'objet quantique n'est pas caractérisé par ses attributs microscopique mais par les observations possibles dans le monde macroscopique. L'observation ne consiste donc pas en l'observation d'une quantité préexistante mais en une production d'une trace macroscopique d'un objet microscopique qui échappe à la description. Cet objet microscopique est donc mis dans une boîte noire* dont on

extrait par la mesure des grandeurs macroscopiques. La boîte noire caractérise l'objet à l'aide d'un concept mathématique appelé l'état* ou la fonction d'onde*, qui permet de calculer les probabilités d'obtenir certaines valeurs lors de l'observation. Car l'observation révèle un univers probabiliste bien particulier où l'on ne peut observer simultanément dans un même acte certaines grandeurs physiques, comme la position et la vitesse d'une particule. Cette non compatibilité des observables provient de leur non indépendance dont les fameuses relations d'incertitude de Heisenberg sont la manifestation. Tout cette complémentarité prend corps et s'articule dans un formalisme mathématique rigoureux, celui des espaces vectoriels et des opérateurs, qui tire parti de la propriété fondamentale et mystérieuse de la mécanique quantique permettant à l'addition de deux états d'être encore un état possible. Propriété mathématique essentielle qui traduit le dualisme onde corpuscule révélé par les phénomènes extraordinaires d'interférences des particules*. Un autre résultat inattendu de la mécanique quantique est l'existence pour des systèmes de particules identiques d'états dits enchevêtrés* qui manifestent une corrélation des observations à très grande distance. Cette corrélation reste une manifestation mystérieuse du monde sub quantique profond. Selon une formule heureuse de Bernard d'Espagnat le réel semble voilé là où comme l'avait écrit Einstein, De Broglie avait levé un coin du voile en associant une onde à toute particule. Le tout se cristallise dans la résolution de la célèbre équation de Schrödinger qui fournit les états possibles du système. Mais il ne faut jamais oublier que le comportement quantique est fragile et disparaît dès que plusieurs objets quantiques interagissent ; c'est la décohérence*.

En définitif la M.Q. est une stratégie de questionnement sur un objet inconnu. Un jeu connu de tous les enfants. Mais en fin de compte l'objet ne se révèle pas et laisse seulement les traces issues du questionnement. Ces traces dévoilent une structure mathématique.

INTERPRETATIONS ET PHILOSOPHIE de la MECANIQUE QUANTIQUE

Comme toute théorie physique, la M.Q. pose deux types de problèmes philosophiques :

des problèmes de philosophie de la nature*

des problèmes de philosophie de la connaissance*

à supposer qu'une théorie physique nous apprenne quelque chose sur la nature et ne soit pas un solipsisme* collectif. La M.Q. est une théorie

de la connaissance microphysique, une épistémologie*, ce n'est pas une microphysique au sens de la physique classique.

Elle se conforme à ce que disait Niels Bohr, son père spirituel :
« Le but de notre description de la nature n'est pas de mettre à jour la véritable essence des phénomènes, mais seulement de mettre en évidence, autant que possible, les relations entre les multiples aspects de notre expérience »

Il importe de bien distinguer les problèmes qui relèvent de la philosophie* de ceux qui concernent les fondements et l'interprétation* de la M.Q. Il est regrettable que la M.Q. serve constamment de prétexte à une confusion entre philosophie*, métaphysique* à vrai dire et épistémologie*. Les discours épistémologiques se parent trop souvent du titre prestigieux de philosophie ou de métaphysique. Les interprétations de la M.Q. ne relèvent pas de la philosophie et encore moins de la métaphysique (Dieu merci !) quoiqu'elles puissent avoir des fondements ou des conséquences philosophiques. Cet usage mystifiant du terme philosophie à propos de la M.Q. ne serait il pas le symptôme d'une absence de véritable réflexion philosophique, due à cette circonstance malheureuse que la M.Q. naît en Allemagne juste avant le grand naufrage que constitue le nazisme, qui marquera pour un temps la fin de la philosophie allemande, c.à.d. d'un certain point de vue la fin de toute philosophie. Les quelques tentatives de réflexion philosophique dans la tradition allemande seront isolées et n'auront que peu d'écho (Weyl*, Cassirer*, Weiszacker*, Kojeve*, Heidegger*). On doit bien sur s'interroger sur l'aspect philosophique de l'œuvre de N. Bohr*, dans sa tentative d'ériger la complémentarité * en doctrine philosophique.

En règle générale les fondateurs de la théorie quantique ne cessent de poser des questions philosophiques, en s'efforçant par exemple de situer les modifications apportées à des concepts fondamentaux comme ceux de substance*, matière*, objet*, atomisme*, continu* et discontinu, acte* et puissance*, propriétés* et qualités*, mouvement*, réel*, objectivité*, état*, phénomène*, lois*, rapports du réel* et du langage, identité*, causalité*, nécessité*, hasard*, déterminisme*.....

La théorie quantique s'inscrit dans un horizon épistémologique dominé par la cybernétique et le structuralisme*. Elle s'avère un des terrains fertiles où se développent ces deux doctrines fondamentales profondément reliées dans leurs visées sémiotiques*. Elle avive un courant de pensée qui a travers Duhem*, Helmholtz* et Hertz* privilégie l'aspect symbolique des théories physiques (Cf. Symbolisme

en physique*). Ce qui fait l'esprit de la cybernétique apparaît de plus en plus comme un changement de mentalité dans la conception du sujet comme objet, avec un renversement de la priorité intérieur-extérieur. L'objet perd son statut d'objet et le discours change de registre. Il ne s'agit plus d'imitation, ni de redoublement, ni même de parodie. Il s'agit d'une substitution au réel des signes du réel. Une opération de dissuasion de tout processus réel par son double opératoire. Au système physique* succède la boîte noire*, l'objet physique sans intérieur. Voilà le message de la M.Q..

En M.Q. la rigueur veut que l'on s'abstienne de tout discours sur la réalité intérieure du système microphysique. Seules ses manifestations extérieures sont prises en compte. C'est bien ce qui est fortement souligné dans toutes les formulations de la M.Q. en terme d'algèbres d'observables*. L'état n'est pas défini en lui-même, mais comme un élément syntactique qui intervient pour structurer rationnellement l'algèbre d'observables, en donnant une consistance mathématique aux entrées (préparation*) et en permettant de calculer les sorties (mesures*, observables*). Il n'y a pas de fonction d'onde avant ou après une expérimentation. Un structuralisme* des observations et non pas un structuralisme des constituants. Construire une boîte noire est une interprétation de la M.Q. qui affirme l'existence d'une réalité à laquelle on n'a pas accès. Une autre interprétation consiste à affirmer qu'il n'y a pas d'autre réalité que le formalisme ; c'est l'interprétation de Copenhague*. Empirisme* contre réalisme.

Le caractère de modèle cybernétique* de la M.Q.s'inscrit tout naturellement dans la définition de la cybernétique par Kolmogorov*, comme modélisation des processus informationnels. J. Bub déclare : « Il faut comprendre la théorie comme réfléchissant les contraintes sur la représentation théorique des processus physiques par certains principes d'interdiction sur l'acquisition, la représentation et la communication de l'INFORMATION ». (Cf. Axiomatique quantique*).

INTERPRETATION RELATIONNELLE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

Selon l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique développée par Carlo Rovelli dans les années 1990, il n'existe pas de propriétés absolues, indépendantes de l'observateur et de l'appareil de

mesure, un peu comme en physique classique où la notion de vitesse absolue n'a pas de sens puisque toute vitesse est relative à un système de référence particulier. Le monde quantique est alors décrit comme un ensemble de relations plutôt que comme une collection d'entités autonomes aux propriétés absolues. Les tenants de l'interprétation relationnelle estiment que bon nombre d'étrangetés quantiques (dualité onde/corpuscule*, non-localité*) surgissent d'un mauvais usage du concept de propriété* et de notre incapacité à prendre en considération le caractère relationnel des propriétés quantiques.

INTERSUBJECTIVITE

Accord entre différentes subjectivités qui se traduit par l'utilisation d'un langage commun. Ce consensus constitue la source de l'objectivation* et de l'objectivité*.

INTUITION

Mode de connaissance directe des choses sans intervention de la raison* ou de la logique. Produit de la sensation pure. Par l'intuition rien n'est pensé.

Pour certains philosophes, l'intuition est la forme supérieure de la connaissance. Chez Platon, c'est l'intuition qui permet la contemplation des Idées*. Spinoza* tient l'intuition en haute estime. Pour Kant* notre connaissance est essentiellement intuitive, c'est l'accès direct aux choses, la manière dont nous sommes affectés par les objets. L'espace* et le temps* sont des produits de l'intuition pure.

En mathématiques, l'intuitionnisme* attribue à l'intuition un rôle plus important que celui de la logique ou de la déduction.

INTUITIONNISME EN MATHEMATIQUES

Courant des mathématiques qui (explicitement ou implicitement) instaure l'intuition comme fondement des mathématiques* ou de la logique formelle*. L'intuitionnisme prétend que les fondations des mathématiques se trouvent dans l'intuition individuelle du mathématicien, faisant des mathématiques une activité intrinsèquement subjective*.

L'intuitionnisme est né au début du XX^{ème} siècle lors de la crise des fondements des mathématiques*. Si dans la théorie des ensembles* de Cantor un objet existe s'il ne comporte pas une contradiction logique formelle, dans l'intuitionnisme cette existence n'est assurée

que si l'on sait construire l'objet par une expérience mentale. C'est une forme de constructivisme*. Il diffère des mathématiques classiques par la non reconnaissance du principe du tiers exclu. Cette réflexion sur l'existence en mathématiques, développée par Brouwer en 1907, est déjà présente chez des mathématiciens comme Gauss*, Kronecker, Poincaré*, Lebesgue, Borel*.

L'intuitionnisme, comme le constructivisme* cherchent à construire les mathématiques sans utiliser l'infini* actuel.

INTUITION TRANSCENDANTALE

INVARIANCE

INVARIANCE ADIABATIQUE (Cf. Adiabatique*)

INVARIANCE CPT

Invariance de toutes les interactions fondamentales par le produit des trois opérations de symétrie discrète, parité* (P), conjugaison de charge *(C) et renversement du sens du temps*. Alors que l'interaction faible* brise chacune de ces trois symétries séparément, aucune violation de l'invariance CPT n'a jusqu'à présent pu être observée.

On peut effectuer différentes combinaisons entre ces symétries discrètes : on peut appliquer une conjugaison de charge C puis une inversion temporelle T à un électron. Ou bien on peut combiner ces trois symétries discrètes et montrer que tous les phénomènes décrits par la théorie quantique des champs restent invariants par rapport à la transformation CPT. En d'autres termes, la symétrie CPT est une symétrie exacte. Si nous découvrons un jour un phénomène qui viole la symétrie CPT, les bases de la théorie quantique des champs s'effondreraient. Mais la majorité des physiciens pense qu'un tel phénomène est très improbable vu le grand succès du formalisme mathématique de la théorie de champs pour décrire la nature. Elle implique qu'une particule a la même masse et le même spin que son antiparticule

Le fait que le temps* (un paramètre mathématique) ait dans cette loi fondamentale de la physique même statut que d'autres grandeurs physique, est une manifestation surprenante de son rôle, déjà rencontrée lors de la mise en évidence des antiparticules*. Il conduit à s'interroger sur la notion de temps et son irréversibilité en microphysique.

L'invariance CPT est une expression mathématique de la causalité*.

INVARIANCE D'ECHELLE

INVARIANCE DE JAUGE (Cf. Jauge-Invariance de*)

INVARIANCE ISOTOPIQUE

INVARIANCE RELATIVISTE

INVENTION

L'invention n'est pas la découverte*. C'est le produit de l'imagination*

Certains mathématiciens, adoptant une attitude platonicienne pensent que les mathématiques sont une découverte d'êtres abstraits, les Idées*, existant dans la nature. Beaucoup de mathématiciens pensent au contraire que les mathématiques sont inventées par l'imaginaire.

En particulier tout ce qui concerne le calcul est une invention. L'arithmétique* est une invention. Newton* et Leibniz* n'ont pas découvert le calcul différentiel* mais l'on inventé. Heaviside* a inventé le calcul vectoriel* permettant d'exprimer l'électromagnétisme de façon élégante. Dirac* a inventé un calcul vectoriel fonctionnel permettant d'effectuer les calculs de la mécanique quantique* de manière automatique.

On a inventé les atomes avant de les découvrir. Feynman* a inventé ses fameux diagrammes pour donner une représentation imagée de l'interaction des particules et des champs.

La psychologie de l'invention fait appel à l'intuition*, à la soudaineté des images*, au combinaisons de signes* et de représentations*.

INVERSE (PROBLEME)

Démarche consistant en la récupération des données concernant un objet, à partir d'une image. La perception est un problème inverse type.

Le problème considère le modèle pour l'instrument qui fournit l'image (sortie) à partir de l'objet d'intérêt (entrée). Le problème inverse est celui de la recherche de l'entrée à partir de la sortie. En un sens la résolution de problème inverse s'apparente à la recherche des

causes d'un phénomène à partir de la manifestation de ses effets sur un dispositif d'observation.

L'exemple standard est donné par la déconvolution*. De nombreuses autres méthodes mathématiques sont utilisées.

Le problème inverse concerne par ses applications de très nombreux domaines : astrophysique*, imagerie médicale, géophysique, surveillance industrielle

IRRATIONALISME

Courant philosophique proclamant le primat de principes non rationnels* régissant le monde et sa connaissance. En opposition à la philosophie classique* qui met au premier plan la raison* et la rationalité* et qui inclut dans sa finalité profonde la mise en évidence du développement logique de cette rationalité, la philosophie post classique* se démarque par le refus de reconnaître les fondements rationnels de la réalité* et par la mise au premier plan de principes irrationnels. Cela ne signifie pas la négation totale du rationnel en général, ni des vertus du rationalisme dans le processus de connaissance*, mais un déplacement radical et une reconsidération de l'accent mis sur la place et le rôle de ces deux constantes anthropologiques et historiques opposées. Depuis la Renaissance et les Temps modernes (Descartes*, Spinoza*, Leibniz*) la philosophie classique s'est mise à identifier le monde et la raison en tant que telle, dénuée de tout irrationalisme, reléguant celui-ci au domaine de l'irréel. Ceci ne pouvait pas ne pas susciter une réaction en opposant en particulier à la raison les forces mêmes de la vie* comme phénomène dépassant la raison. De telle tendances irrationnelles se sont introduites dans des doctrines philosophiques profondément rationnelles par la forme, sans prendre pour autant un aspect organisé et sans influencer le pathos de l'époque - Rousseau* et ses idées de retour à la nature comme telle, que l'on peut appréhender et dont on peut jouir sans connaissance et sans explication ; Goethe* et son ravissement devant la beauté de la vision directe et de la sensation ; Schlegel* et les autres romantiques allemands avec leur appel au refus de s'aventurer dans « l'espace vide de la pensée absolue ».

Le romantisme, au sens philosophique du terme est un mouvement esthétique-littéraire, à prétention théorique, qui apparaît en Allemagne à la fin du 18^{ème} siècle, autour des frères Schlegel* et de Novalis et Hölderlin. Mais ce mouvement littéraire est très proche de

l'idéalisme allemand*, des philosophies spéculatives : Schelling*, Hegel*, particulièrement. Il s'agit de philosophies à ambition totalisante qui veulent rendre compte de la totalité du réel à partir d'un principe unique. La certitude de la science est totale dans le domaine du phénomène, mais elle n'atteint pas la chose en soi, c'est-à-dire l'essence ou la réalité fondamentale du monde, la réalité ultime. D'une façon générale, le romantisme prétend confier à l'art la mission de saisir l'essence du monde que la science est incapable d'exprimer. Il prend la relève de la métaphysique après Kant*."Est romantique toute position considérant que l'art permet de connaître l'essence du monde, tandis que la science ne peut en saisir que le phénomène ou l'apparence". Selon Schopenhauer* : "Nous pouvons par conséquent définir l'art : la contemplation des choses, indépendante du principe de raison" (Le Monde comme volonté et comme représentation). L'aspect philosophique de cette crise succède à la philosophie des Lumières* et au criticisme kantien. Kant* a démantelé la métaphysique, ruiné ses prétentions. Les romantiques sont contraints d'en prendre acte : impossible pour la philosophie d'accéder à l'absolu. Mais les romantiques proposent une solution de rechange, qui n'est autre que la théorie spéculative de l'Art : la poésie - et plus généralement l'Art - remplacera le discours philosophique défaillant.

Ainsi, quoique les tendances irrationnelles puissent être constatées sur une longue période de développement philosophique, le terme lui-même ne se rapporte vraiment qu'à des courants philosophiques qui se constituent à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. A cette époque les états d'âme irrationnels se développent en liaison avec l'accentuation des symptômes de crise de la société. Bien plus qu'auparavant se manifeste l'irrationalité de la réalité sociale, dont la prise de conscience provoque une réorientation radicale au sein de la philosophie. Il apparaît une conscience de crise qui s'élève contre les systèmes harmonieux dont la force principale était la science* comme quintessence de la raison. Débute une époque d'une profonde sensation irrationnelle du monde, lorsque l'irrationalité de la société est associée et interprétée au travers d'un caractère analogue de la nature humaine elle-même. D'où une protestation radicale contre le panlogisme d'un univers tronqué et simplifié. Cette philosophie irrationnelle est représentée clairement à cette époque par la philosophie de la vie, tout d'abord Nietzsche*, puis Dilthey et Bergson*. L'irrationalisme imprègne ou motive bien des démarches artistiques ou cognitives, de la psychanalyse (Freud* et Jung*) au futurisme et au dadaïsme, de l'expressionnisme à l'art abstrait. Des courants philosophiques irrationalistes apparaissent, comme la

phénoménologie* suivie plus tard par l'existentialisme. La guerre de 14-18 marque fortement les esprits, et favorise l'éclosion de mouvements de révolte contre la rationalité de la société bourgeoise, dont le surréalisme est une manifestation typique.

La seconde guerre mondiale avec ses horreurs et l'apparition de la bombe atomique a surtout donné naissance à des mouvements anti-science*. L'après guerre et la guerre froide sont les témoins d'une intense confrontation idéologique entre le matérialisme dialectique* et les idéalismes* des pays capitalistes. Le marxisme* est d'ailleurs un des derniers avatars de ce rationalisme, qui postulait la possibilité de trouver un sens rationnel à l'histoire humaine et d'agir en conséquence. Vers la fin des années cinquante, en réaction aux irrationalismes, se développe un courant de rationalisation de l'irrationnel, c.à.d. de l'inclusion dans les connaissances de ce qui auparavant se situait dans l'inconnaissable. Ce courant est fortement lié essentiellement au structuralisme* qui s'intéressait surtout à l'étude de diverses manifestations objectives du conditionnement social de la conscience et du comportement humain. Il s'agissait d'expliquer les structures inconscientes de la socialisation et les rapports de ces structures avec les complexes linguistiques au moyen des méthodes de la linguistique structurale* et de la théorie de l'information*, afin chez Lévi-Strauss* d'analyser la pensée mythologique comme un inconscient collectif, ou chez Foucault* dans « *L'histoire de la folie* », ou dans l'œuvre de Lacan.

Selon Peter Sloterdijk le présent connaît lui aussi une vague d'antirationalisme où se mélangent les uns aux autres les motifs d'une « autre raison » : ceux de la logique du sentiment et du mysticisme, de la méditation et de la prise de conscience de soi, du mythe et de la conception magique du monde. Que dire de la déconstruction* de Derrida ou de l'anarchisme épistémologique de Feyerabend*, du post modernisme* et de la contre culture ?

IRREVERSIBILITE

La plupart des processus physiques se déroulent asymétriquement dans le temps en accord avec le second principe de la thermodynamique* qui affirme la croissance de l'entropie*. Ce sont des processus évolutifs* opposés aux processus stationnaires*. Mais les lois de la dynamique qui régissent les constituants des systèmes sont invariantes par rapport au renversement* du paramètre temps*. Et ce

n'est pas l'emploi des probabilités qui permet de raccorder les deux points de vue, laissant en définitive douter du caractère physique de la variable temps linéaire qui figure dans les équations fondamentales.

Peut-on parler du caractère réversible ou non réversible d'un phénomène naturel ? La question n'est bien posée que si elle concerne les descriptions que nous pouvons proposer de ce phénomène, et la réponse dépend de façon essentielle de l'échelle à laquelle on se place. L'exemple de la diffusion* ou celui de la cinétique chimique montrent que peuvent coexister une description déterministe*, discrète et réversible (à l'échelle microscopique), des descriptions aléatoires*, continues et irréversibles (aux échelles intermédiaires, mésoscopiques) et une description déterministe, continue et irréversible (à l'échelle macroscopique).

IRREVERSIBLES (PROCESSUS)

Processus physiques qui ne peuvent se dérouler spontanément que dans un sens déterminé du temps*. Il s'agit par exemple de la diffusion*, du transport de la chaleur, de la thermodiffusion, de l'écoulement visqueux.. et de tous les processus dissipatifs*. Tous les processus irréversibles sont des processus de non équilibre, et ne peuvent ramener le système à son état initial sauf à modifier le milieu extérieur.

Dans les systèmes fermés les processus irréversibles entraînent une augmentation de l'entropie*. Dans les systèmes ouverts, qui peuvent échanger de la matière ou de l'énergie avec le milieu environnant, lors de processus irréversibles l'entropie peut rester constante ou même diminuer par suite d'échange d'entropie avec le milieu. Mais dans tous les cas le bilan d'augmentation de l'entropie reste positif.

ISOMERIE

ISOMORPHISME

Un des concepts fondamentaux de la mathématique contemporaine exprimant l'identité de structure* entre des ensembles munis d'une structure algébrique* (groupe*, anneau, champ...). Pour

deux ensembles d'objets munis chacun d'une loi de composition interne à l'origine d'une structure algébrique, l'isomorphisme est l'existence d'une correspondance d'objets à objets satisfaisant les lois de composition interne respectives.

L'étude d'un ensemble isomorphe à un autre suffit pour établir les propriétés de l'autre. L'un est le modèle de l'autre. L'utilisation des isomorphismes est une des clés de la modélisation en cybernétique* et en physique*.

ISOTOPES

Chaque élément chimique, peut être mis en correspondance avec des éléments possédant le même nombre d'électrons, et donc les mêmes propriétés chimiques (la même case du tableau de Mendéleev*), mais dont les noyaux conservent le même nombre de protons et diffèrent par le nombre de neutrons. Ce sont les isotopes. On connaît ainsi à côté du carbone C^{12} le carbone C^{14} héros des datations archéologiques, à côté de l'oxygène O^{16} l'oxygène O^{18} composant l'eau lourde. Les isotopes sont souvent instables et leur transmutation constitue le phénomène de radioactivité*.

JAUGE

Le mot jauge signifie en général instrument de mesure. Une jauge de niveau permet de connaître le degré de remplissage d'un réservoir tout comme une jauge de pression permet de connaître la pression dans un dispositif gazeux ou liquide.

JAUGE (CHAMP DE)

Cf. Champ de jauge*.

JAUGE (INVARIANCE DE)

L'invariance de jauge est l'invariance des propriétés physiques dans une transformation de jauge, c'est à dire dans une transformation dans l'espace interne* dépendant ou non du point d'espace-temps. C'est le principe unificateur du modèle standard* des particules élémentaires : toutes les interactions fondamentales obéissent à un principe d'invariance locale de jauge.

L'invariance de jauge désigne de manière générale l'invariance par transformation du système de coordonnées dans l'espace abstrait des fonctions mathématiques des observables telles que le vecteur d'état de la mécanique quantique. La mécanique quantique elle même peut être considérée comme la mathématique des transformations de jauge dont les générateurs correspondent aux différentes observables

physiques. Par généralisation du théorème de Noether*, l'invariance de jauge globale (c'est à dire ne dépendant pas des points de l'espace temps) conduit à la conservation de la charge électrique, et les champs électriques et magnétiques peuvent être introduits pour préserver l'invariance de jauge locale.

Précisons tout cela en remarquant que l'objet principal de la mécanique quantique, le vecteur d'état ou la fonction d'onde est une grandeur complexe. Mais toutes les observables se construisant par intervention simultanée de la fonction d'onde et de sa complexe conjuguée sont réelles. Il s'ensuit que toutes les observables ne seront pas modifiées si l'on multiplie toutes les fonctions d'onde par un nombre complexe de module unité. La théorie ne dépend pas du choix de l'origine des phases. Les résultats de la mécanique quantique sont invariants par rapport à une transformation de phase globale.

Mais la mécanique quantique n'est pas invariante par rapport à une transformation de phase locale, c'est à dire à des transformations de phase qui ne sont pas les mêmes en tous les points de l'espace.

Comment peut-on rétablir l'invariance ? En introduisant un nouveau champ, dit de compensation locale ou champ de jauge*, qui « sent » l'espace interne* où nous effectuons le changement de phase. La phase étant liée à la charge, l'espace interne est ici l'espace de charge. L'invariance de jauge est l'invariance par le choix arbitraire de la « direction » de la charge en tout point de l'espace temps. En résultat lors d'une transformation de phase locale la fonction d'onde et le nouveau champ se transforment à la fois, ce qui compense les variations de la théorie. On parle souvent de calibration mutuelle. Munie de son champ de compensation la mécanique quantique devient invariante de jauge. Le fait extraordinaire et inattendu est que ce champ de jauge* a toutes les propriétés formelles du champ électromagnétique* et que ses équations d'évolution coïncident avec les équations de Maxwell*. La transformation de jauge coïncide alors pour le champ électromagnétique avec la transformation bien connue des potentiels, potentiel électrostatique* et potentiel vecteur* qui laisse les équations de Maxwell invariantes. C'est cette transformation des potentiels qui est à l'origine historique de la notion de transformation de jauge. Son importance doit son origine au fait que c'est en terme de ces potentiels que s'exprime le mieux l'action du champ électromagnétique sur un système quantique.

L'introduction du champ électromagnétique comme champ de jauge est analogue au principe faible d'équivalence* dans la théorie de la gravitation* d'Einstein*, dans laquelle une transformation locale du

Le système de coordonnées est équivalente à l'apparition d'un champ complémentaire, le champ de gravitation*.

Toute invariance de jauge est liée à la conservation d'une observable selon le théorème général de Noether*. L'invariance de jauge en électromagnétisme est liée à la conservation de la charge électrique dans les interactions électromagnétiques. D'autres interactions (interaction faible*, interaction forte*) correspondent à d'autres lois de conservation et à d'autres invariances de jauge. C'est là le principe de l'unification des interactions dans le modèle standard* des particules et des champs.

GAUGE (INVARIANCE DE) (La vision du raton laveur*)

L'invariance de jauge* est un des concepts les plus élaborés de la physique contemporaine. Le raton laveur pense que le lecteur mérite qu'on lui raconte cette histoire avec des mots différents pour dire la même chose.

L'invariance de jauge c'est l'invariance des prévisions de la théorie par rapport à une transformation locale de jauge, transformation géométrique dans un espace de liberté interne*. Cette invariance est un des présupposés fondamentaux de la théorie des particules élémentaires*. C'est grâce à ce concept géométrique que l'on peut d'une manière cohérente commune décrire les interactions fondamentales. Rien ne changera dans les prévisions de la théorie si l'on modifie la phase dans la partie imaginaire de la fonction d'onde. La phase n'a qu'une valeur relative et modifier la phase n'est qu'une rotation dans l'espace des états (modifier l'angle du vecteur associé au nombre complexe est une rotation). La fonction d'onde est un vecteur et sa rotation n'influe pas sur le calcul des observables. Ainsi la mécanique quantique est invariante par rapport à une rotation de phase globale, dite transformation de jauge globale. Global signifie que la transformation est la même en tous les points de l'espace. La même dans deux laboratoires différents.

Mais la mécanique quantique est elle invariante par rapport à une rotation de phase locale (transformation de jauge différente selon le point de l'espace) ? Que se passe-t-il si l'on fait des rotations de phase différentes selon le laboratoire ? La mécanique quantique n'est pas invariante. L'équation de Schrödinger n'est pas la même. L'évolution de la fonction d'onde est différente selon les laboratoires.

On peut rétablir l'invariance si l'on introduit un nouveau champ physique qui « sent » l'endroit où se fait la rotation et la compense en conséquence. Un champ de compensation locale, dit champ de jauge*.

Munie de ce champ la mécanique quantique devient invariante de jauge. Ce nouveau champ a toutes les propriétés du champ électromagnétique*, interagissant comme lui avec la matière. Il semble naturel d'identifier ces deux champs dans la théorie.

La requête d'une invariance de jauge introduit par surprise le champ électromagnétique dans la théorie. Il apparaît ainsi spontanément sans qu'il faille le considérer à part. Il se trouvait là, il suffisait de le mettre en évidence. Argument très fort pour le réalisme* en mathématique

De manière tout à fait analogue on peut introduire des transformations de jauge plus complexes responsables de l'invariance dans un espace de degrés de liberté plus complexe. Ainsi par exemple l'invariance par rapport à la rotation des quarks* dans l'espace coloré fait que l'interaction forte* peut aussi être décrite comme un champ de jauge*. L'interaction faible ne peut être décrite ainsi séparément, mais il s'avère que l'on peut décrire ensemble l'interaction faible et l'interaction électromagnétique comme deux manifestations d'un seul et même champ de jauge dit électrofaible*.

Ainsi trois des interactions fondamentales peuvent être obtenues sur la base de l'invariance de jauge. Voilà une construction élégante et économe d'une théorie physique*.

L'interaction gravitationnelle* joue un rôle à part. La théorie de la relativité générale* est elle aussi une théorie d'invariance de jauge. Mais elle n'est pas une théorie quantique et l'invariance de jauge s'y manifeste non pas dans un espace interne* mais dans l'espace-temps ordinaire.

JEUX (THEORIE DES)

JUGEMENT

L'opération par laquelle l'esprit reconnaît et exprime qu'une chose ou un événement est ou n'est pas d'une certaine manière, qu'une qualité convient ou ne convient pas à une substance. Le jugement comme toute pensée est le reflet* de la réalité dans le cerveau humain. On ne pense jamais isolément une idée* ou un concept*. Le jugement apparaît comme le premier acte complet et concret de connaissance* et l'idée apparaît comme une abstraction*. L'énoncé d'un jugement est une proposition*.

KABBALE

La Kabbale désigne l'ensemble des conceptions ésotériques ou mystiques associées au judaïsme. C'est un ensemble de textes produits entre la terminaison du Talmud (600) et le XVI^e siècle. Le judaïsme s'appuie sur les textes de la Bible, accompagnés de nombreux commentaires de caractère souvent normatif (Mishna, Talmud, Midrasch). La Kabbale fournit des commentaires gnostiques, hermétiques*, ou mystiques cherchant à révéler la nature et la structure du Divin, ce qui est nouveau dans le judaïsme traditionnel. A la différence des philosophes rationalistes comme Maimonide*, elle s'appuie non pas sur des méthodes intellectuelles et logiques, mais sur une approche mystique spécifique. Elle n'est pas seulement une contemplation métaphysique mais une démarche opératoire.

La nouveauté essentielle de la doctrine kabbalistique se trouve dans la conception des secrets des vérités divines. La physionomie de la Divinité décrite par les kabbalistes, est absolument différente des autres formes rencontrées dans le judaïsme. Au lieu du législateur et du guide sévère, du père clément, de l'être nécessaire et du moteur mystérieux des philosophes, qui sont toutes des images unitaires, la Kabbale présente une physionomie divine composite et complexe. Ce n'est pas une Divinité unique mais des substances divines distinctes se manifestant dans le système des dix séphiroths. Il existe cependant un Dieu caché inaccessible qui n'est pas le Dieu de la révélation sinaitique et prophétique. Un Dieu au caractère apophatique*, assimilé au Non-être, au Rien*, au Néant* ou au Vide*. Un Dieu sans limites (En Sof). Pour dire à quel point l'essence divine est insaisissable les kabbalistes rivalisent avec les néoplatoniciens* et Pseudo Denys l'Aéropagite* (Cf. Vide –Histoires de*)

Les œuvres les plus connues sont le Livre de la Création (VI^e siècle), le Zohar (XIII^e siècle) et les doctrines d'Isaac Louria (XVI^e siècle). Toutes ces œuvres sont surtout le fait de juifs vivants sur le pourtour de la Méditerranée.

Les thèmes majeurs sont le char (trône) de Dieu, la présence de Dieu dans le monde et l'arbre des séphiroths associé au Dieu inaccessible.

Il existe dix séphiroths, que l'on représente quelquefois dans dix cercles différents enfermés l'un dans l'autre ou sous la forme d'un arbre. Ils forment la base d'un vaste système de combinaisons, de filiations et de correspondances révélant la structure du monde et du Divin.

Les dix séphiroths sont : 1. Le pneuma du Dieu vivant, son souffle ; 2. De ce souffle sort par condensation l'élément primordial de l'air identifié avec l'éther ; 3. L'eau. De l'eau primordiale vient le tohu-bohu ; 4. Le feu. Du feu primordial sort le Trône de la Gloire ; 5,6,7,8,9,10. Les six directions de l'espace.

Les interprétations des séphiroths sont variées. On peut ainsi énumérer une autre version : 1, La couronne; 2 , la sagesse; 3, l'intelligence; 4 , la force (ou la sévérité) ; 5, la miséricorde (ou la magnificence); 6 , la beauté; 7, la victoire (ou l'éternité); 8 , la gloire; 9, le fondement; 10, le royaume. Ce sont les perfections et les attributs de l'Essence divine, lesquelles sont liées inséparablement entre elles, et de l'assemblage desquelles dépend la création, la conservation et la conduite de l'univers.

Il faut aussi remarquer la liaison qui existe entre ces splendeurs, et celles qu'elles ont avec les créatures qui composent l'univers. A chaque séphiroth on attache un nom de Dieu, un des principaux anges, une des planètes, un membre du corps humain, un des commandements de la Loi, et de là dépend l'harmonie de l'univers. D'ailleurs, une de ces choses fait penser à l'autre, et sert de degré pour parvenir au plus haut degré de la connaissance et de la théologie contemplative. Enfin, on apprend par là l'influence que les splendeurs ont sur les anges, sur les planètes et les astres, ainsi que sur les parties du corps humain.

La kabbale d'Isaac Louria, au demeurant très complexe, introduit un thème nouveau, celui de l'exil et de la rédemption. A cette fin il met en place un système cosmologique et théogonique particulier .

L'acte primordial n'a pas été une œuvre de révélation et de rayonnement, mais une œuvre de rétrécissement et de contraction (tsimsoum) de Dieu sur lui-même pour laisser une place au monde (Et Dieu créa le vide pour y installer le monde). I. Louria s'est posé la question de savoir comment le monde peut-il exister si Dieu se trouve partout, si l'essence d'En Sof (l'Infini) remplit toutes choses. Si Dieu est « tout en tout » comment peut-il y avoir des choses qui ne soient pas Dieu ? Comment Dieu peut-il créer le monde ex nihilo s'il n'y a pas de néant ?

Selon Louria, Dieu fut contraint de faire une place pour le monde, pour ainsi dire, en abandonnant une région à l'intérieur de lui même, une sorte d'espace mystique duquel il se retire pour y retourner dans l'acte de la création et de la révélation. Le tsimsoum ne désigne pas la concentration de Dieu en un point, mais sa retraite loin d'un point.

La lumière de Dieu sur le monde était contenue dans des vases qui se brisèrent. L'homme ne résista pas à l'épreuve et succomba au péché original.

S'ensuit une période de réparation des vases cassés, une restauration du monde dévolue à l'homme. Israël dans le monde a comme fonction des rassembler toutes les parcelles de sainteté qui ont été dispersées. La venue du messie ponctuera l'achèvement de ce processus entamé depuis les origines, et la rédemption d'Israël coïncide avec celle du monde entier. L'exil et la rédemption ne sont pas uniquement des faits historiques propres au peuple d'Israël, mais des faits intéressant tout ce qui existe, y compris le mystères de la Divinité elle même.

Cette conception participe de la pensée traditionnelle sur l'analogie du microcosme* et du macrocosme, et s'inscrit dans la ligne de pensée de l'Alchimie*, science de la régénération. On y constate en effet un vocabulaire et des conceptions très fortement alchimiques, comme la dualité expansion-contraction formulée dans le précepte « Solve et coagula ».

La cabbale lourianique a exercé à travers le XVIII ème siècle son influence sur la spiritualité juive au niveau du mouvement hassidique, qui la relaye dans le XIX ème siècle et la première moitié du XX ème. Le philosophe russe Mikhail Epstein en retrouve les traces dans la poésie des poètes juifs russes B. Pasternak et O. Mandel'shtam ainsi que dans des conceptions des linguistes formalistes russes, les juifs I. Tynianov, B. Shklovski et B. Eikhenbaum.

Les conceptions kabbalistiques ont eu une influence en dehors du monde juif. Il a même existé à la Renaissance un mouvement de kabbalistes chrétiens. Newton* et Leibniz* n'ont pas été insensibles aux idées de la Kabbale (Cf. Science et Kabbale*)

KANTISME

L'œuvre philosophique de Kant* a laissé sur la philosophie occidentale une marque indélébile à l'égal de celle laissée par Platon*. On parle de kantisme tout comme on se réfère au platonisme*. La philosophie de Kant* a influencé de nombreux mouvements de la philosophie moderne, de l'idéalisme allemand* à la phénoménologie*, du pragmatisme* à l'empirisme logique*. Les grands savants allemands du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle évoluaient dans une atmosphère intellectuelle kantienne. Les Naturwissenschaften se développent au XIX^e siècle, jusqu'à la formation de la mécanique quantique incluse, dans une référence permanente aux questions posées par Kant.

A la base de la philosophie de Kant se trouve l'idée de l'opposition entre le monde des choses* et le monde des phénomènes*. Kant niait la possibilité de connaître l'essence des choses, la possibilité de connaître « les choses en soi ». Il supposait que l'intelligence prenant connaissance du monde des phénomènes exprime le matériel obtenu sous une forme sensible logique. Kant se donne dans la métaphysique le rôle d'un Copernic dans la physique astronomique, en prétendant placer le cerveau humain au centre de toute critique de la connaissance et en faisant tourner l'univers autour de lui. L'idée fondamentale de la philosophie de Kant a été par la suite souvent utilisée pour une interprétation idéaliste des données de la physique dans un esprit agnostique*.

Kant considérait les concepts d'espace* et de temps* comme purement subjectifs. Selon lui ces concepts résultent d'une capacité particulière de l'esprit humain à exprimer le monde des phénomènes dans des formes logiques définies. L'espace et le temps ne sont rien d'autre que les formes à priori de la perception sensible, précédant toute connaissance expérimentale. En d'autres termes, l'espace et le temps, au lieu d'être des attributs* inhérents aux objets de notre connaissance, sont des éléments de notre connaissance elle-même, considérée indépendamment de ses objets ; ils sont ce que Kant appellera des formes* de notre sensibilité, par opposition à la matière* de cette sensibilité, dans laquelle consistent précisément les objets ; ils sont des intuitions* pures ; ils sont des données à priori de notre connaissance. L'espace et le temps ne sont pas considérés comme les objets mais comme les conditions du savoir. Ils représentent des schémas de connexion selon la coexistence ou la succession. Catégories à priori, l'espace et le temps ne préexistent pas dans l'esprit comme une sorte de donnée psychique, comme une référence universelle et absolue dans laquelle s'ordonnerait la perception. Ils interviennent dans et par l'expérience : la compréhension universelle du rapport mutuel des objets forme son contenu dynamique. Ces idées interviennent de manière active dans les considérations fameuses de Kant sur l'analytique et le synthétique*, l'a priori et le posteriori*.

Kant fonde ainsi ce qu'il nommera la philosophie transcendantale* qui porte non sur les objets mais sur notre manière de les connaître.

La philosophie critique (le criticisme) de Kant est une tentative de conciliation du rationalisme* et de l'empirisme* par la limitation du champ de notre connaissance aux objets d'expérience. En mettant au premier plan le rôle actif de l'esprit dans le processus de connaissance, la philosophie de Kant est une des principales sources de

l'anti-réalisme* moderne. Kant affirme que les objets de notre connaissance ne sont que des apparences et que « la chose en soi » est inconnaissable. Les objets empiriques ou les apparences ne sont que des représentations* et n'ont pas d'existence en eux même. Le kantisme est une forme de phénoménalisme* et une variété de fictionnalisme* (« Philosophie du comme si* »).

KIRCHHOF (LOI DE)

LAGRANGIEN (ou Fonction de Lagrange)

LAMARCKISME

LAMB (DEPLACEMENT DE) (EFFET)

Différence entre l'écartement observé des niveaux d'énergie atomiques et l'écartement calculé par la théorie de Dirac*. Cet effet résulte du couplage de l'électron avec le champ électromagnétique du vide*, en grande partie par interaction avec les fluctuations du vide* et pour une petite part par suite de la polarisation* du vide.

LANGAGE

Un langage est un phénomène sémiotique* dynamique complexe. Sémiotique parce que c'est un système de signes* doté d'une syntaxe* et pourvu d'un caractère sémantique*. Dynamique parce qu'il est le siège d'une évolution temporelle. Complexe par ce qu'il présente de nombreuses propriétés des systèmes complexes, dont l'auto-organisation* et l'autonomie*. Un langage est un phénomène de communication entre individus vivants. Une communication qui ne laisse pas le langage inchangé et influe sur sa structure.

Que le langage doive être considéré comme un système autonome est une conception qui affleure déjà chez Kant*, et se trouve implicitement exprimée chez un néo kantien comme Helmholtz*. Ce savant s'appuie sur Kant et sur ses propres travaux de physiologie pour dire que si la perception* peut représenter un chose extérieure, elle le fait ordinairement d'une manière bien éloignée de la simple description des propriétés de la chose. La perception comme le langage (une théorie physique* en particulier) fonctionnent de manière autonome. Ils donnent de la nature une représentation non pas par de simples images* figuratives, photographiques, mais par images

symboliques*. Dans un discours langagier la correspondance n'est pas entre choses* et symboles*, mais entre organisation des choses et organisation des symboles dans le langage. C'est une isomorphie*. C'est à l'opposé d'un atomisme logique*. Un holisme* systémique.

Il faudra attendre les travaux sur l'intelligence artificielle* pour reprendre en un sens la pensée de Helmholtz et la développer, là où la linguistique et la sémiotique du XX^e siècle n'ont que très peu tiré partie de l'idée d'autonomie, s'accrochant plutôt aux concepts de référent* et de signifié*. Faute de concepts techniques que seuls les développements des théories de l'autoorganisation vont fournir à partir des années 70. On assiste alors à un rapprochement marqué entre biologie et sémiotique, dans l'appellation de biosémiotique*. Les travaux de robotique s'intéressent au langage comme système adaptatif complexe, et soulignent la nature émergente du langage et du sens.

Un langage, ce n'est pas seulement un moyen de communication : c'est d'une part une représentation du monde, et c'est, de l'autre et surtout, un moyen d'imposer cette représentation au corps social. Une représentation du monde : on peut par exemple assigner aux mêmes mots des valeurs différentes, parfois antinomiques en fonction de cette vision : pensons aux mots « terroriste » et « résistant », qui désignent toujours les mêmes personnes, mais dans deux univers de pensée distincts. Il s'agit ensuite d'imposer ce mode de pensée en le faisant passer pour naturel, comme allant de soi. Il y a donc, depuis toujours, une lutte pour la maîtrise sur les mots, comme il y en a une pour la maîtrise sur les médias : le pouvoir nous impose sa vision à travers son langage. C'est pourquoi — et ce n'est pas innocent —, on a appris à utiliser « flexibilité » et non « droit de jeter les gens comme un bout de papier gras », on trouve normal de dire « restructuration » et non « augmentation des gains des actionnaires », « délocalisation » et non « licenciement ». Cette lutte pour les dénominations est courante en sciences. Champ auto-cohérent ne s'est pas imposé face à champ self-consistant. Quanton ne s'est pas imposé pour désigner une particule quantique. Par contre on a imposé l'horrible dénomination « intrication » pour traduire l'anglais « entanglement », au lieu d'enchevêtrement, plus évocateur. Pourquoi le terme mécanique quantique désigne une théorie de probabilités et la théorie de la relativité recouvre une théorie de l'invariance ?

LASER

Dans un laser, un grand nombre d'atomes ou de molécules ont été portés dans un état excité (inversion de population) et placés entre deux miroirs. Ils sont désexcités par les allées et venues entre les

miroirs d'un faisceau de lumière qui s'enrichit ainsi chaque fois de la lumière émise (par émission dite induite*, en opposition à l'émission spontanée*) et se trouve ainsi amplifié. LASER représente précisément les initiales de : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement).

Le mécanisme intime de fonctionnement du laser se traduit par des conditions physiques et des équations qui en font un auto-oscillateur*. Phénoménologiquement le laser obéit à des équations de Van der Pol*. C'est un générateur quantique de rayonnement. Les atomes ou les molécules sont excités de manière continue par un courant électrique qui sert de paramètre de contrôle. En dessous d'une valeur critique le dispositif se comporte comme une lampe ordinaire où la lumière est émise de manière incohérente. Au dessus de cette valeur critique les propriétés de la lumière changent qualitativement d'une manière dramatique. On assiste à l'émergence* d'une seule onde lumineuse, la lumière cohérente*. Celle ci gouverne les actes d'émission des atomes ou des molécules individuels qui lui sont asservis. La lumière cohérente est à la fois extraite du dispositif et rebouclée sur son entrée. Comme dans les instruments de musique* c'est l'onde produite qui gouverne en rétroaction le dispositif exciteur. Il y a là une véritable transition de phase* avec brisure de symétrie*. Dans cette transition de phase une nouvelle structure temporelle est formée par autoorganisation*, puisque aucune onde n'est injectée de l'extérieur qui introduit seulement un courant croissant.

Le laser est un système ouvert avec un entrée d'énergie (courant électrique) et une sortie d'énergie qui en plus de la lumière laser comprend des pertes sous forme incohérente (chaleur).

Dans des conditions spécifiques (pertes élevées dues aux miroirs) la lumière laser peut se comporter de manière chaotique* (autooscillateur chaotique*).

Les applications du laser sont innombrables et imprègnent tout le tissu technologique et industriel contemporain. On y utilise souvent les fortes intensités lumineuses disponibles (Cf. Optique non linéaire*).

LEPTONS

Particules élémentaires* à spin $\frac{1}{2}$ (fermions*) ne participant pas aux interactions fortes*. Les leptons participent aux interactions faibles* et électromagnétiques* ainsi qu'à l'interaction

gravitationnelle*. A la catégorie leptons appartiennent l'électron*, le muon*, les trois neutrinos* le lepton lourd*(τ)

LIAISON

LIAISON CHIMIQUE

Le triomphe de la chimie* au XIX^e siècle est dû à l'établissement, de la notion fondamentale de l'existence d'atomes et l'idée de liaison entre atomes résulte d'une comptabilité minutieuse des les trois chimiques. Chaque atome est doté d'une valence exprimant le nombre de liaisons simples qu'il est susceptible d'établir avec les autres atomes. L'hydrogène a une valence 1, l'oxygène une valence 2, l'azote une valence 3, le carbone une valence 4. Les structures des molécules expriment la saturation des valences comme dans l'eau OH_2 , l'ammoniac NH_3 et le méthane CH_4 . L'extraordinaire développement de la chimie est dû au rôle créatif que joue ce langage dans l'esprit des chimistes jusqu'à nos jours.

Au début du XX^e siècle l'hypothèse atomique est confirmée et la théorie quantique de l'atome, s'approprie cet objet en le considérant comme un noyau autour duquel tournent les électrons. Ce sont ces électrons qui sont responsables de l'activité chimique des atomes. Une image simple fondée sur la structure électronique de l'atome d'hydrogène est appliquée à la structure de tous les atomes et l'application d'un principe spectroscopique, le principe de Pauli*, en ne permettant qu'à deux électrons de spin opposés de se trouver dans le même état, conduit à retrouver brillamment la classification périodique des éléments*. Cette idée simple d'électrons appariés apporte naturellement l'idée de considérer la liaison chimique comme l'appariement de deux électrons de spin opposés, appartenant à des états semblables de deux atomes. La liaison chimique par paires d'électrons. A ce niveau l'image de la liaison chimique enrichie reste encore tributaire de l'idée d'électrons indépendants munis de trajectoires discernables. Cette idée hante l'imaginaire* de tous les chimistes contemporains. L'ensemble de la chimie s'expose dans ce cadre là, qui permet de considérer des déplacements d'électrons à l'intérieur des molécules, et de distinguer des liaisons covalentes et des liaisons ioniques. L'hypothèse atomique triomphe.

Mais la mécanique quantique* va plus loin, en proclamant l'indiscernabilité* des électrons et l'antisymétrie de l'état total, dont le principe de Pauli est une conséquence. Le calcul dans ces circonstances de la molécule d'hydrogène, attribue l'énergie de la liaison à l'énergie d'échange*, reflet de la corrélation électronique* à faible distance. Les

calculs de la chimie quantique* confirment cette interprétation de l'existence moléculaire, tout en montrant que les électrons s'accumulent le long des liaisons chimiques classiques. Mais d'un point de vue énergétique l'existence de la molécule ne peut plus être considérée comme un accrochage d'atomes par un « objet » nommé liaison chimique. La molécule est un tout d'électrons sans trajectoires, indiscernables, l'état de la molécule est un état enchevêtré* et la notion de liaison chimique s'est fortement affaiblie. Ces circonstances sont à l'origine de nombreuses théories et de nombreux débats en chimie quantique, mais laissent le chimiste expérimentateur indifférent.

On assiste là à l'échec d'un réductionnisme à outrance du Tout en ses parties. Cette conséquence de l'enchevêtrement* pour la stabilité de la matière est un des faits majeurs de la philosophie naturelle* contemporaine.

LIAISON HYDROGENE

Lorsque l'atome d'oxygène a satisfait sa tendance naturelle à se lier avec d'autres atomes, et que ses électrons périphériques sont engagés dans ces liaisons, il lui reste une paire d'électrons « libre ». Lorsque l'atome d'hydrogène se trouve engagé dans une liaison avec un atome plus lourd, les électrons de la liaison se trouvent accaparés par cet atome, laissant le proton* quasi nu. Dans cette situation il s'établit entre la paire libre et le proton une liaison résiduelle, d'origine électrostatique, sept à huit fois plus faible que les liaisons ordinaires. C'est la liaison hydrogène.

Par sa réelle action de liaison et la facilité de son établissement ou de sa rupture elle joue un rôle considérable dans le monde moléculaire.

Elle intervient de manière essentielle dans la structure de l'eau*, où la liaison hydrogène couple en chaîne les molécules d'eau. Elle est responsable des multitudes de propriétés de l'eau dans la nature et du rôle omniprésent de l'eau dans les activités technologiques. La liaison hydrogène permet le transfert de protons ce qui donne une grande réactivité aux milieux aqueux.

Cette importance de l'eau a toujours été reconnue en en faisant un élément primordial avec la terre ou le feu, et en distinguant clairement le sec de l'humide. Sans l'eau la vie* n'est pas possible.

La liaison hydrogène est responsable de la structure et de la souplesse de l'ADN* et des protéines*.

LIAISON MECANIQUE

LIBERTE

LIBRE ARBITRE

La notion même de libre arbitre est sujette à discussion. C'est un des grands thèmes de la métaphysique*. Car il est en dernier ressort impossible de prouver qu'un organisme humain choisit son évolution possible. Même si l'on établissait l'existence de bifurcations* dans la dynamique d'un individu, on ne pourra jamais prouver que le choix de l'évolution est librement décidé et non pas imposé par les conditions extérieures ou le hasard*.

Le problème du libre arbitre est lié à celui du déterminisme*. Le déterminisme est la thèse que le futur est entièrement déterminé par la conjonction du passé et des lois de la nature. Dans ces conditions le libre arbitre n'existe pas, même si une évolution déterministe n'est pas nécessairement prédictible* (Chaos déterministe*).

Il faut remarquer que Boussinesq*, en publiant « *Conciliation du véritable déterminisme mécanique avec l'existence de la vie et de la liberté morale* (Paris, 1878), republié tel quel en 1922, tente de résoudre la contradiction entre déterminisme et liberté en remarquant que l'unicité des solutions des équations différentielles satisfaisant à des conditions initiales données cesse d'être vraie aux points des solutions singulières (bifurcations*). Cette théorie, provoque une polémique dans les milieux savants. Boussinesq invoque la nécessité d'un principe directeur extérieur, ce qui revient à rejeter le déterminisme sur l'environnement ou à supposer en dernier recours que l'homme dispose de principes lui permettant de décider quel chemin suivre. Le libre arbitre intervient comme une réponse aux incertitudes de la mécanique classique*.

On a voulu voir dans les incertitudes de la mécanique quantique*, liées à l'existence d'un hasard véritable, une occasion de plus de réintroduire le libre arbitre. Mais supposer un libre arbitre de l'expérimentateur, dans le choix d'une mesure, équivaut à supposer un libre arbitre des particules, ce qui entraîne pour le moins l'impossibilité d'une théorie à variables cachées* (Cf. Libre arbitre et mécanique quantique*). Il faut avouer que les zones d'ombre sur la microphysique et notre ignorance des mécanismes intimes du comportement humain rendent cette discussion pour le moins prématurée (Cf. Mécanique quantique et esprit*). La psychanalyse considère d'ailleurs que la plupart de nos actes dépendent plus de notre inconscient que de notre volonté consciente.

La question du libre arbitre restera encore longtemps un problème métaphysique (au-delà de la physique), dans la mesure où il fait intervenir la responsabilité morale de la personne. Entre prédestination et libre arbitre le choix reste impossible.

LIBRE ARBITRE ET MECANIQUE QUANTIQUE

La mécanique quantique est présentée habituellement comme une théorie non kolmogorovienne des probabilités. Avant la mesure un objet quantique ne possède pas la propriété recherchée. Comment cette propriété se concrétise-t-elle ? C'est le mystère de la réduction* de l'état. Mystère qui ne peut être résolu par une théorie à variables cachées locales, rendue impossible par les travaux de Bell*, confirmés par l'expérience.

L'axiomatique quantique* cherche à se libérer de l'hypothèse probabiliste en formulant la théorie comme résultant de certaines restrictions fondamentales, élucidant par là même le sens des différentes hypothèses qui la constitue.

C'est dans ce contexte qu'il faut envisager les résultats récents de nature logique sur le « libre arbitre » en microphysique. Selon J. Conway et S. Kochen, une entité dispose de libre arbitre à l'instant t si son état ne peut pas être décrit comme résultat de l'application d'une fonction, au sens mathématique, portant sur l'état de l'Univers avant l'instant t . Ce libre arbitre, qui n'a rien à voir avec les probabilités puisqu'il affirme juste la non-existence d'une certaine fonction, est un indéterminisme logique (ou si l'on veut préciser, fonctionnel). Ce travail est fondé sur trois axiomes en partie testables. Deux sont liés à la mécanique quantique et l'autre à la relativité. Sur la base de ces axiomes, les auteurs démontrent que si un expérimentateur dispose du libre arbitre, alors les particules elles-mêmes disposent aussi de libre arbitre. L'utilisation du concept de libre arbitre peut choquer, mais, l'expression est bien choisie : elle force à repenser l'indéterminisme de la mécanique quantique sans l'associer à des probabilités, ce qui en éclaire le sens et la portée.

Cet indéterminisme est l'impossibilité logique qu'il existe certaines fonctions reliant les états de l'Univers, impossibilité qui entraîne que d'instant en instant l'Univers n'est pas contraint par son passé, mais libre de son évolution.

Le type de liberté des particules jumelles, et plus généralement l'enchevêtrement* quantique, montrent que quelque chose de très différent de l'aléatoire classique des probabilités joue ici. (...) Dans l'état actuel des connaissances, il est certainement au-delà de nos capacités de compréhension d'établir un lien entre les décisions libres

des particules et celles des humains, mais l'aléatoire de la théorie de probabilités ne rend compte ni du libre arbitre des humains ni de celui des particules.

L'indéterminisme de la mécanique quantique est bien plus subtil et profond que celui décrit par les probabilités et c'est ce que le théorème du libre arbitre montre de manière flagrante, changeant sans doute profondément les analyses qu'on fera à partir de maintenant de la mécanique quantique.

J.P. Delahaye conclut une analyse de la question en disant : Il ne fait pas de doute que l'effort nécessaire pour suivre l'argument de J. Conway et S.Kochen est assez important, c'est souvent le cas en mécanique quantique, mais si la chose avait été totalement évidente, on n'aurait pas attendu 2006 pour découvrir cette conséquence inattendue de deux des théories les mieux vérifiées de la physique. Comme le raisonnement isole parfaitement les points de ces théories nécessaires pour le mener et qu'il ne présuppose donc aucune des autres affirmations de ces théories, c'est l'intérêt de la mobilisation des esprits mathématiques, on découvre que les difficultés créées par les théories physiques modernes résultent d'un nombre très limité d'affirmations. Parmi les trois axiomes, deux sont testables. Le troisième ne l'est pas, car la propriété de localité qu'il exprime est aussi impossible à prouver que la fausseté du solipsisme. Il est cependant en parfaite conformité avec toutes les expériences qu'on peut mener et qui n'ont jamais permis le transfert instantané d'informations d'un point de l'Univers à un autre. Précisons que les expériences dites de téléportation quantique* n'ont jamais pour conséquence le transfert instantané d'informations choisies ou la mise en évidence d'actions causales instantanées, mais qu'elles réalisent seulement, comme dans le cas des particules jumelles (qu'elles utilisent) la révélation d'informations partagées inconnues et sans doute indéterminées... ce qui est très différent. L'utilisation du terme libre arbitre par les deux mathématiciens est une provocation délibérée dont le but est de faire comprendre que l'indéterminisme a été, à tort, lié aux probabilités, alors que sa véritable nature réside dans la définition fonctionnelle de la non-détermination d'un fait ou d'une information relativement à un contexte physique. Voici ce qu'en disent J. Conway et S.Kochen:

« Certains pensent que la seule alternative au déterminisme est l'aléatoire de la théorie des probabilités et ajoutent pourtant qu'autoriser l'aléatoire dans le monde n'aide pas vraiment à comprendre le libre

arbitre. Nous pensons que les processus probabilistes classiques comme le lancer d'une pièce parfaite n'aident pas à expliquer le libre arbitre, mais nous pensons qu'il se pourrait bien aussi qu'utiliser l'aléatoire de la théorie de probabilités n'aide pas

plus à expliquer les effets quantiques que notre théorème met en avant.

Le type de liberté des particules jumelles, et plus généralement l'enchevêtrement quantique, montrent que quelque chose de très différent de l'aléatoire classique des probabilités joue ici. [...] Dans l'état actuel des connaissances, il est certainement au-delà de nos capacités de compréhension d'établir un lien entre les décisions libres des particules et celles des humains, mais l'aléatoire de la théorie de probabilités ne rend compte ni du libre arbitre des humains ni de celui des particules.»*

Le mérite de ce théorème est de montrer que le calcul des probabilités quantiques* a des origines logiques profondes, ce qui explique sa spécificité.

LIGNE D'UNIVERS

Trajectoire dans l'espace-temps* décrivant le mouvement d'un corps*. Lieu géométrique de tous les événements de l'espace-temps marquant l'existence d'un corps. Toute ligne continue de l'espace-temps.

LILOU

Canular post moderne*. L'adorable chatte qui a accompagné l'écriture de ce lexique, en se couchant bien souvent sur mes documents. Le complice des petites libertés que se permet l'auteur en dehors du style académique.

LIMITE

LIMITE CLASSIQUE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

LINEAIRE ET NONLINEAIRE

Linéaire, c'est lorsque l'effet est proportionnel à la cause et le non linéaire c'est la situation où l'effet est une amplification de la cause. Dans le non linéaire l'effet est une surprise par rapport à la cause.

Le terme de linéaire désigne avant tout une situation où deux variables sont proportionnelles. En mathématiques la fonction* la plus simple est la fonction $y=ax$ représentée par une droite. En physique c'est le cas lorsqu'un système répond de manière proportionnelle à

l'excitation. Ainsi pour un pendule aux faibles amplitudes, la force de rappel est proportionnelle à l'écart par rapport à l'équilibre. C'est la raison du comportement oscillatoire sinusoïdal du pendule, dit comportement harmonique.

Cette situation se traduit au niveau des équations différentielles* par des équations linéaires, c.a.d des équations dont la somme de deux solutions est encore solution. En fait des équations où les variables n'apparaissent que comme des fonctions linéaires (ax ou les dérivées de x)

Un système physique linéaire* est un système physique qui satisfait au principe de superposition*, c.a.d . un système pour lequel la réponse à la somme de deux signaux* en entrée est la somme des réponses à chacun des signaux séparément.

Dans la physique mathématique* du XIXème siècle dominée par les équations différentielles, l'étude des équations différentielles linéaires est grandement facilitée par l'emploi des méthodes de l'algèbre linéaire* et de l'analyse de Fourier*. Il y a un univers de Fourier qui triomphe avec l'électromagnétisme* et plus tard avec la mécanique quantique*. C'est pourquoi l'apparition vers la fin du XXème siècle de méthodes d'études des systèmes non linéaires (systèmes dynamiques*) a été comme un coup de tonnerre sur la physique, remettant en scène des disciplines comme la mécanique statistique*, l'hydrodynamique*, et favorisant le développement de nouvelles disciplines comme l'optique non-linéaire*.

Le linéaire est à l'origine des magnifiques phénomènes d'interférences de l'optique ondulatoire* et de l'acoustique*. Le linéaire s'identifie avec la mécanique quantique fondée sur le principe de superposition*, qui fait de l'espace des états un espace vectoriel* et permet de représenter les observables par des opérateurs* linéaires sur cet espace. Ceci permet d'ailleurs d'introduire la théorie des groupes* en mécanique quantique. La linéarité de la mécanique quantique* est responsable directement du théorème de non-duplication*.

La non linéarité c'est l'idée qu'une petite cause peut avoir un grand effet disproportionné et que l'effet peut rétroagir sur la cause. Ce couplage du non linéaire* et de la rétroaction* qui fait la spécificité des auto-oscillateurs* et leur universalité. Une vision très large de l'auto-organisation* et de la naissance des formes*, un sens approfondi de la notion d'autonomie*. Une attention profonde aux paramètres qui contrôlent le comportement des systèmes et dont la variation provoque des bifurcations* qui peuvent entraîner des régimes chaotiques*.

La non-linéarité est responsable du chaos déterministe* et de l'apparition des formes* et de comportements spécifiques dans de nombreux systèmes physiques et biologiques.

Il est apparu une culture non-linéaire*.

LINEARITE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

La linéarité* de la mécanique quantique est introduite par le principe de superposition* des états* permettant de rendre compte du dualisme onde-corpuscule*. Toute la théorie tourne autour de cette propriété en organisant les états comme des ondes, des « ondes d'états ».

Le fait pour la M.Q. d'être une théorie linéaire est en accord avec la description des états stationnaires et l'absence de toute représentation des transitions quantiques* entre ces états.j.

Une conséquence innattendue, quoiqu'immédiate, de cette linéarité est le théorème de non duplication* des états quantiques. Il joue en théorie de l'information quantique un rôle central similaire à celui joué par les relations d'indétermination de Heisenberg*.

LINGUISTIQUE STRUCTURALE

Ensemble de conceptions et de méthodes linguistiques fondées sur la considération de la langue comme système* de signes* avec des éléments structuraux fortement individualisés et tendant, tout comme une science exacte, à une description formalisée du langage. Une attention toute particulière est accordée aux structures du langage constituées par les relations (et oppositions) entre les éléments du système linguistique, leurs ordres, leurs hiérarchies et leur organisation en niveaux. La langue n'est pas un acte mais un système, où ce qui est significatif n'est pas le signe, l'élément, mais le rapport entre les signes: les phonèmes (éléments sonores) ne sont considérés que dans un système d'opposition où "cocon" se distingue de "cochon"; les sèmes (éléments sémantiques) également s'inscrivent dans des systèmes binaires du type: haut-bas, lumière-obscurité, etc. Ce sont donc les écarts différentiels, sonores ou sémantiques, qui comptent: la langue est un système de différences.

La linguistique structurale s'est formée dans les années 20 sous l'influence de deux grands linguistes, le genevois F. de Saussure* (Cours de Linguistique Générale. 1916) et le russe R. Jakobson*.

R. Jakobson a qualifié de structuralisme* les trois affirmations de Saussure sur le langage :

la nature systémique du langage, le tout* y étant plus que la somme des parties,

la conception relationnelle des éléments du langage, où les entités linguistiques sont définies par des relations de combinaison ou d'opposition les unes aux autres,

la nature arbitraire des éléments linguistiques qui sont définis d'après la fonction ou le but qu'ils remplissent plutôt qu'en terme de leurs qualités inhérentes

La linguistique structurale a ouvert la voie à la linguistique mathématique.

La linguistique structurale a servi de modèle pour le développement de théories structuralistes dans les sciences humaines : le Structuralisme*.

LOCALITE

LOGICIEL

Traduction du terme anglais Software, le logiciel constitue l'ensemble des programmes informatiques* et des procédures nécessaires au fonctionnement d'un système informatique. Dans la famille des logiciels, on trouve par exemple des logiciels d'application qui sont spécifiques à la résolution des problèmes de l'utilisateur (progiciel, tableur, traitement de texte, grapheur, etc.), mais aussi des logiciels d'enseignement ou didacticiels, des logiciels de jeu ou ludiciel, etc.

LOGICISME

Courant des mathématiques affirmant le primat de la logique sur les mathématiques, et se donnant comme but de fonder les mathématiques sur la base de principes logiques. Les logicistes ne voient pas dans la logique et les mathématiques deux disciplines différentes, et pensent que toute la mathématique peut être déduite de la logique pure.

C'est là une démarche qui remonte à Leibniz, et s'est développée dans les travaux de Frege* et Russel*. Bourbaki* a tenté une démarche en ce sens qui n'a pas été convaincante. Les travaux de

Gödel ont d'ailleurs montré l'échec d'un tel point de vue même pour les mathématiques élémentaires.

LOGIQUE

A strictement parler la logique n'est pas une science mais une technologie contre le mensonge. Elle permet la détermination formelle de vérités* à partir de vérités préexistantes.

Le célèbre syllogisme d'Aristote en est un exemple.

Tous les hommes sont mortels

Socrate est un homme

Donc Socrate est mortel

La logique est une analyse des techniques de raisonnement. Un des problèmes fondamentaux de la logique est la systématisation formelle et le catalogage des procédés exacts* de raisonnement. On distingue la logique ordinaire (linguistique) et la logique formelle* (mathématique).

La logique est une discipline qui oscille entre la philosophie* et la mathématique*.

LOGIQUE DES PREDICATS

Branche de la logique mathématique qui étudie les opérations sur des propositions construites avec un sujet* et un prédicat*. Le calcul des prédicats s'appuie sur la logique propositionnelle en l'incluant.

LOGIQUE MATHEMATIQUE (LOGIQUE FORMELLE)

Dite aussi logique théorique ou logique symbolique. Partie des mathématiques consacrée à l'étude des démonstration mathématiques et des fondements des mathématiques.

L'idée de construire un langage universel pour l'ensemble des mathématiques et de formaliser ainsi les démonstrations remonte à Leibniz*. Mais ce n'est qu'au milieu du XIX^{ème} siècle qu'apparurent les travaux d'algébrisation de la logique aristotélicienne. Boole (1847) et de Morgan (1858) en furent les pionniers. Après que Frege (1879) et Peirce (1885) eurent développé la logique propositionnelle* et la logique des prédicats*, la puissance de ce langage se dévoila aux mathématiciens. Kant* croyait à tort que la logique de son temps, celle d'Aristote, était une science complète et définitivement achevée (préface de la seconde édition de la critique croyait de la raison pure, 1787). Les logiciens du XIX^e siècle se sont rendu compte que la théorie d'Aristote ne dit rien ou presque sur la logique des relations. Frege et

beaucoup d'autres ont comblé cette lacune en définissant la logique des prédicats*. Une nouvelle logique était née après celle d'Aristote.

LOGIQUE PROPOSITIONNELLE

Calcul sur les propositions utilisant les opérations logiques, c.a.d. les lois de composition des propositions définies par les lois de composition de leurs valeurs logiques (vrai ou faux, 1 ou 0)

Le tableau de correspondance entre les valeurs logiques des propositions de départ et de la proposition résultant de l'opération logique est dit table de vérité de l'opération logique qu'il définit. On distingue les opérations logiques selon le nombre de propositions sur lesquelles elles portent.

Les opérations logiques d'ordre un sont

La tautologie de P « P est P » 1-1 ; 0-1

L'affirmation de P « on a P » 1-1 ; 0-0

La négation de P « on a non P » 1-0 ; 0-1

La contradiction de P « P n'est pas P » 1-0 ; 0-0

Les opérations logiques d'ordre deux sont essentiellement

La conjonction de P et Q « P et Q » P&Q

La disjonction de P et Q « P ou Q » P∨Q

L'implication de Q par P « P implique Q » P→Q

Opérations correspondant aux opérations ensemblistes de réunion, d'intersection ou d'inclusion.

A ces opérations viennent s'ajouter les quantificateurs :

Le quantificateur d'universalité « quelque soit P »

Le quantificateur d'existence « il existe P »

Il existe différents systèmes de calcul des propositions qui se distinguent par le choix des axiomes. Ainsi Hilbert* a proposé les quatre axiomes suivants :

(AVA) ---A (tautologie)

A--- (AVB)

(AVB) --- (BVA) (commutativité)

(A---B) --- [(CVA) --- (CVB)] (ce qui est l'analogie de

la relation arithmétique : si A est inférieur à B, A+C est inférieur à B+C).

LOGIQUE QUANTIQUE

LOGIQUE DE LA SCIENCE

LOGOS

LOGOCENTRISME

LOI DE COMPOSITION INTERNE

Loi, qui dans un ensemble d'objets, fait correspondre un objet de l'ensemble à toute paire d'objets. L'addition et la multiplication sont des lois de composition interne dans l'ensemble des nombres réels*. Le produit de deux rotations dans le plan est une rotation, c'est donc un loi de composition interne.

LOIS DE LA NATURE

Depuis les débuts de la science on a constaté que dans la diversité des faits observables dans la nature* il existe des répétitions et des régularités. On a longtemps considéré cela comme résultant de l'existence de règles extérieures auxquels la nature doit se conformer, comme la volonté d'un créateur. Ce n'est que plus récemment que les lois de la nature ont été définies comme les régularités qui existent dans la nature en dehors de nos tentatives pour les observer.

Les lois de la nature sont supposées objectives*, exprimant la vérité des choses et par là même leur raison d'être. Elles sont distinguées des lois de la science, les lois de la physique* en particulier, qui sont considérées comme des principes qui forment un système fort, simple et unifié utilisé pour prédire et expliquer.

Les lois de la nature sont universelles et nécessaires, mais par là même elles sont idéales et jamais véritablement observées dans le monde réel. Ce sont donc des abstractions*, des références idéales et de ce fait difficiles à distinguer des constructions constituées par les lois de la science. On peut douter de leur objectivité surtout lorsque comme Hume* ou Mach* on les considère comme de résumés de nos impressions sensorielles.

Le problème des lois de la nature entretient une discussion philosophique sans fin centrée autour de leur nécessité et de leur normativité. Nécessité liée à notre situation dans le monde ou aux impératifs de la logique comme le soutiennent les positivistes logiques* ?

On retrouve la discussion entre réalisme scientifique* et empirisme* pour savoir si les lois appartiennent à la réalité ou ne sont que des structures de notre connaissance et de nos théories. Tout en reconnaissant que les lois que nous révèle notre connaissance peuvent

être le reflet* de lois de la nature. Ceci est particulièrement visible sur les grandes lois de la physique comme les lois de symétrie ou les lois statistiques.

Ainsi de la discussion entre la loi et le phénomène, sur le point de savoir si les symétries sont dans la loi ou dans le phénomène, si le phénomène brise la symétrie ou encore comme le disait Pierre Curie, si c'est la dissymétrie qui crée le phénomène.

D'une manière générale les symétries sont considérées comme faisant partie intégrante du monde physique, comme des propriétés existant dans la nature. On peut arguer de ce que c'est leur statut ontologique* qui est la raison de leur succès dans la physique. Ainsi s'expliquerait le rôle déterminant de la symétrie dans la physique des particules élémentaire et dans l'unification des interactions fondamentales.

On peut par ailleurs remarquer que les symétries spatiotemporelles des lois physiques sont interprétées comme des symétries de l'espace-temps lui même, comme une structure géométrique du monde physique.

Les révolutions conceptuelles créées par la mécanique quantique* avec la notion de mesure* et la théorie des systèmes dynamiques* avec la notion de chaos* déterministe, bouleverse la notion de lois de la nature en introduisant la connaissance dans la formulation même de ces lois. La formulation des lois dépend de la précision des connaissances.

L'univers étant en évolution, on peut valablement se poser la question de savoir si les lois de la nature ne changent pas avec le temps ? Les constantes universelles restent elles constantes ? Des mesures ultrafines sont tentées pour vérifier cette hypothèse, mais aucun résultat concluant n'a été obtenu.

LOIS DE LA PHYSIQUE

LONGUEUR DE PLANCK

La longueur de Planck est généralement décrite comme la longueur à partir de laquelle la gravité* commencerait à présenter des effets quantiques, ce qui nécessiterait une théorie de la gravité quantique* pour être décrite. En conséquence, la longueur de Planck serait, dans l'état actuel de la physique, la longueur minimale qu'il soit possible de mesurer de façon significative. C'est la longueur où le concept d'espace-temps continu cesse d'être applicable, car les vibrations de point zéro du champ gravitationnel brouillent la

géométrie euclidienne. Elle s'exprime au moyen de constantes

universelles : $\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$,

LORENTZ (FORCE DE)

LORENTZ (TRANSFORMATION DE)

LUMIERE

Au second jour de la création, selon le récit de la Génèse, Dieu créa la lumière. Il institue ainsi la lumière comme composante essentielle de la nature, au même titre que la matière*. Une bonne partie de l'histoire de la physique est dans l'étude de la nature de la lumière (Optique*) et des rapports entre la lumière et la matière. Ces rapports sont extrêmement ambigus. Si la lumière est un fluide ou une propriété de l'éther*, c'est alors une matière qui permet de distinguer tous les corps, en ne se distinguant pas elle-même. Les yeux sont sensibles à la lumière alors que le toucher est sensible à la matière.

Elle est intouchable, unpalpable, translucide, elle traverse tous les corps, elle est émise par la matière, elle se propage instantanément, elle chauffe les corps et peut créer le feu. Ce n'est pas une matière. Mais qu'est ce que c'est donc ?.

Durant des siècles, études et spéculations se succédèrent. Quelques noms émergent comme ceux d'Archimède, d'Ibn al Haytham (Alhazen) ou de Robert Grossetete. Il faudra attendre la fin du XVII^e siècle pour que Huygens* formule une théorie ondulatoire de la lumière. Théorie peu suivie devant les succès d'une théorie corpusculaire due à Newton*. Ce n'est qu'un siècle plus tard que Young* et Fresnel*, ignorant Huygens, établirent la nature ondulatoire de la lumière pour expliquer en particulier les beaux phénomènes d'interférences*. De la lumière ajoutée à la lumière donne de l'obscurité ! La théorie ondulatoire s'impose alors, d'autant plus que Maxwell prouve que les ondes électromagnétiques* prévues par ses équations se propagent à la vitesse de la lumière. Matière et champ sont des concepts fondamentaux (Optique ondulatoire*). Curieuses ondes dont le caractère transversal, prouvé par la polarisation de la lumière, défie tout modèle d'éther pouvant les propager. Lente agonie de l'éther qu'achèvera la théorie de la relativité restreinte*. La lumière n'est pas matière.

Entre temps, Planck*, pour interpréter la loi des rayonnement du corps noir*, avance l'hypothèse de l'échange d'énergie par quanta* entre la lumière et la matière. Avec sa fougue habituelle, Einstein*,

accrédite l'idée que ces quanta sont constitutifs de la lumière Une lumière granulaire pour interpréter l'effet photoélectrique* ou les fluctuations* du rayonnement du corps noir. Les fluctuations du mouvement brownien* étaient dues au mouvement des atomes de la matière. Les fluctuations du rayonnement du corps noir sont dûes aux photons présents dans la lumière. Un dualisme onde-corpuscule* se met en place pour la lumière, inspirant De Broglie* pour l'association d'une onde à tout corpuscule.

Cette nature duale de la lumière, onde et corpuscule, se trouve alors incorporée dans le formalisme mathématique de la théorie quantique du champ électromagnétique (Electrodynamique quantique*). Le photon est un quantum du champ quantifié. Le nombre de photons présents et l'intensité du champ sont des grandeurs macroscopiques fluctuantes constituants des observables non compatibles*. La matérialité du photon se manifeste par un clic discret dans un photodétecteur*. C'est la seule trace expérimentale du photon. En l'absence de photons subsiste un champ électromagnétique fluctuant associé au vide quantique*. L'ensemble des phénomènes où se manifeste l'aspect corpusculaire de la lumière constitue l'optique quantique*.

« Pour que la lumière se montre telle qu'elle est en elle-même, il faudrait pouvoir la saisir, l'arrêter dans sa folle course. Pour la voir autrement que par ses effets, il faudrait un contenant qu'elle ne puisse ni traverser, ni affecter d'aucune manière. Or on ne peut contraindre la lumière sans l'altérer. Vouloir la saisir c'est déjà la forcer à se montrer comme nous voulons bien la voir. Onde ou corpuscule ? La lumière complaisante se plie à l'objectif de nos instruments, qui la force à se montrer d'une façon ou d'une autre. Onde et corpuscule ne sont que deux portraits exclusifs, non pas de la lumière, mais d'une manière de l'interroger sous la contrainte. Qu'est ce que la lumière sans la matière avec laquelle elle réagit et se manifeste comme lumière ? » Damien Schoevaert

Le photon, de masse au repos nulle, se dote d'une personnalité au sein des particules élémentaires*. Il participe à la grande synthèse de l'unification des interactions fondamentales. On invente même des photons virtuels dans le vide quantique pour transmettre les interactions électromagnétiques.

Dirac* et De Broglie* expriment leur scepticisme devant ces jongleries mathématiques destinées à garantir la dualité onde-corpuscule. On ne connaît toujours pas le support des ondes électromagnétiques. Le champ serait-il vraiment une réalité ultime ? Le mystère de la lumière reste complet.

LUMIERE BLANCHE

La lumière blanche est représentée comme un processus aléatoire* dont la décomposition de Fourier* fournit des composantes pour toutes les fréquences du spectre visible (spectre continu*). Ces constituants mathématiques sont révélés dans certaines expériences physiques comme lumières colorées (spectre*).

Contrairement à ce que pensait Newton* la lumière blanche n'est pas un mélange* de lumières colorées mais une superposition* de telles lumières dans son expérience de reconstitution de la lumière blanche. Qui plus est la lumière blanche se présente comme un phénomène global dont l'analyse mathématique révèle des composantes monochromatiques, les composantes de Fourier.

Il n'est pas correct de croire que la lumière solaire consiste en fait en ondes monochromatiques de couleurs différentes, tout comme dans une boîte de peintures à l'huile on trouve des tubes de couleur rouge ou des tubes de couleur jaune ou bleue. Il n'y a rien de tel dans la lumière solaire. La lumière solaire est un processus désordonné de variation du champ électromagnétique . On peut mathématiquement représenter ce processus sous forme d'une somme de sinusoides, mais seulement mathématiquement. Ces sinusoides n'existent pas en fait. Ce sont des sinusoides représentatives qui n'existent que dans nos formules, mais pas dans la lumière solaire.

Utiliser le terme de mélange additif pour le distinguer du mélange soustractif pour désigner l'addition des lumières colorées est extrêmement dangereux. Newton lui-même faisait des confusions entre les deux « mélanges » et il faudra attendre Helmholtz* pour que la distinction soit clairement faite sur la base de la théorie ondulatoire de la lumière. Le discours contemporain sur la couleur maintient souvent cette confusion.

Il faut bien distinguer la lumière blanche définie physiquement de ce qui est perçu par la conscience comme lumière blanche (blanc artificiel) par suite du phénomène de métamérie. L'addition de deux couleurs complémentaires donne du blanc artificiel.

LUMIERES (LES) (Aufklärung en allemand)

Dénomination d'un mouvement d'idées qui caractérise la culture européenne du XVIII ème siècle. Un siècle marqué par un grand développement économique, qui précède les débuts de la révolution industrielle et par l'apparition d'une nouvelle classe sociale : la

bourgeoisie. C'est cette bourgeoisie qui insuffle un esprit de libération des contraintes sociales traditionnelles et instaure une croyance au progrès. Un progrès qui se dessine à travers une activité scientifique multiforme, héritière des grands acquis du XVII^e siècle.

Philosophes et savants proclament ensemble une liberté de pensée au service de l'exercice de la raison*.

Les Lumières ne sont pas tant les témoins de l'apparition de nouvelles idées que celui de la grande diffusion et de l'articulation des courants de pensée anciens. Un effort de vulgarisation de la connaissance, dont l'Encyclopédie* de Diderot* et d'Alembert* est l'exemple éclatant. Un effort d'émancipation et d'autonomie, par la libération des autorités religieuses et un développement de la connaissance. La quête du bonheur remplace celle du salut. Une affirmation des droits inaliénables de l'être humain, que viendra concrétiser la déclaration des Droits de L'Homme affirmée par la Révolution Française. Kant* proclame le libre exercice de la raison* critique libérée des contraintes traditionnelles. Mais si les Lumières sont une expression de la libre pensée elles ne sont pas pour autant une incitation à l'athéisme.

Parce que l'on considère les Lumières comme constitutives de notre modernité, la question de savoir « Qu'est ce que les Lumières ? », posée par Kant, reste d'actualité. Elle est toujours discutée par les philosophes contemporains comme Habermas* ou Foucault*. Les Lumières sont même contestées par le post-modernisme*.

Les représentants marquants des Lumières sont : Voltaire*, Hume*, Lavoisier*, Lessing*, Kant*, Vico*, Diderot*, Goethe*, Montesquieu, Condorcet, Franklin, Buffon*.

LVOV-VARSOVIE (ECOLE DE LOGIQUE DE)

Le plus important mouvement de logique, de mathématiques et de philosophie en Pologne, ayant acquis une renommée européenne. Mouvement créé par le philosophe Kasimierz Twardowski (1868-1938), élève de Franz Brentano* à Lvov.

Ses élèves s'intéressèrent à la logique. Le premier fut Jan Lukasiewicz (1878-1956) qui devint professeur à Varsovie. D'autres élèves furent , Kazimierz Ajdukiewicz (1890-1963), Tadeusz Kotarbiński (1886-1981) auxquels se joignit Stanisław Leśniewski (1886-1939. Alfred Tarski* (1901-1983) s'intégra à ce groupe à

Varsovie de 1918 à 1939. Il est célèbre pour son étude de la vérité dans les langages formels et son théorème de non définissabilité*.

Cette école, partagée entre Lvov et Varsovie, joue dans la pensée européenne un rôle aussi important que le Cercle de Vienne*. Elle a contribué de façon majeure au développement de la logique au XX^e siècle.

MACH (Principe de)

MACHISME

A strictement parler conceptions philosophiques de Ernst Mach*, aussi dénommées empiriocriticisme*. Au sens large il s'agit de conceptions subjectives et idéalistes en philosophie et en méthodologie des sciences, une variété de positivisme*, formulées tant par Mach* que par Duhem*. Les vues de Poincaré* sont proches du machisme.

Mach défend un principe d'économie de la pensée et un idéal purement descriptif de la science. Les objets ne sont que des complexes de sensations.

Ses positions philosophiques ont eu une influence considérable sur tous les physiciens du début du XX^e siècle, Einstein* compris. Il peut être considéré comme le fondateur de l'empirisme logique* (positivisme logique) viennois. Sa position a été fortement attaquée par L. Boltzmann* et par V.I. Lénine (dans « Matérialisme et empiriocriticisme »).

Par son antiréalisme et son antimatérialisme, en ramenant la réalité à un complexe de sensations, il s'opposait à Helmholtz* pour lequel les sensations n'étaient pas des reflets fidèles des choses mais des symboles des choses. Pour Mach c'est la chose qui est une abstraction, un symbole de pensée.

MACHINE (La machine et l'homme)

MACHINE DE TÜRİNG

MACROCOSME ET MICROCOSME (Cf. Microcosme et macrocosme*)

MACROMOLECULE BIOLOGIQUE

MACROSCOPIQUE

Le macroscopique est un état de la matière correspondant au modèle atomiste classique où atomes et molécules interagissent faiblement par les forces intermoléculaire et sont soumis à l'agitation thermique. Cet état peut être gazeux, liquide ou solide selon la portée de ces interactions.

Les propriétés quantiques caractéristiques des atomes et des molécules ont disparues par décohérence* à ce niveau d'organisation. Tout comme pour le nanomonde*, le macroscopique n'est pas une notion d'échelle*.

MACROSCOPIQUES (Effets quantiques)

Rien n'interdit à priori d'observer des effets quantiques sur des corps macroscopiques, sauf à risquer de voir ces effets disparaître par suite de la décohérence* provoquée par les perturbations extérieures.

Si pour certains le macroscopique commence à 60 atomes, que dire des interférences observées dans les trous d'Young pour des atomes de fullerène (C_{60}) ? Observera-t-on un jour la même chose pour un chat passant par un des trous mais accompagné de son onde de de Broglie* ?

A basse température, il existe une classe importante d'expériences macroscopiques, dans les résultats desquelles la constante de Planck* apparaît de manière explicite au point de pouvoir être mesurée. La plupart de ces expériences sont liées à la superfluidité* de l'hélium liquide ou à la supraconductivité* des métaux.

MAGIE QUANTIQUE

L'objet quantique a une ubiquité fondamentale qui le distingue de l'objet classique. Le dualisme onde-corpuscule* exprime une coexistence du local* et du non local*, que l'on observe sans pouvoir l'expliquer par un modèle physique classiquement. C'est cette béance explicative qui peut donner aux phénomènes observés un caractère magique. Pour autant que la magie présente des phénomènes où la chaîne explicative est rompue pour un observateur qui n'a recours qu'à des arguments de la physique classique.

Au centre de la magie quantique se trouve le concept d'état* quantique. On peut dire que c'est une magie de l'état, profondément liée à son interprétation physique. La magie de la superposition des états*, la magie de l'enchevêtrement* dans les états enchevêtrés*, la

magie de la décohérence*.. Une formidable avancée depuis trente ans des méthodes expérimentales actualisant de manière dramatique les problèmes d'interprétation de la mécanique quantique*. Car les expériences sont une chose, ce que l'on en dit une autre.

Une magie qui a comme toute magie recours à l'illusion que certains objets sont séparés alors qu'en réalité ils ne le sont pas. Les causes de leur liaison restant mystérieuses, les effets de cette liaison apparaissent comme magiques. La corrélation quantique* des états enchevêtrés orchestre tout ce spectacle expérimental.

Une magie qui sort des laboratoires et se concrétise dans des dispositifs techniques comme ceux de la cryptographie quantique* ou de l'ordinateur quantique*. Procédés mis en œuvre par des sociétés commerciales comme « Magic Q » (New York) ou « id Quantique » (Genève). Cet aspect technique donne aux corrélations quantiques une « réalité » au-delà de nos conceptions théoriques.

MARXISME

MASER

MASSE

Mesure de l'inertie* et de l'attraction des objets matériels* entre eux. Dans le premier cas, lié à la seconde loi de Newton* on parle de masse inerte. Dans le second cas, lié à la loi de la gravitation universelle*, on parle de masse gravitationnelle. Pour un choix convenable de la constante gravitationnelle, masse inerte et masse gravitationnelle coïncident.

La masse au repos* est une caractéristique essentielle de la matière* et des champs* (Cf. Particules élémentaires*, Particules et champs*).

L'équivalence entre la masse et l'énergie* pose la question de savoir lequel des deux concepts est le plus fondamental. Il semble que ce soit l'énergie, car en définitive une particule élémentaire* ne se manifeste que par un transfert d'énergie (clic dans un détecteur)

MASSE AU REPOS

Masse d'un corps dans un référentiel où il se trouve au repos. Un tel référentiel n'existe pas pour le photon*(constance de la vitesse de la lumière). Il n'y a donc pas pour lui de masse au repos. On peut la considérer comme nulle.

MATERIALISME

Monisme* philosophique opposé à l'idéalisme*.

Le matérialisme est un réalisme* qui considère la matière* comme principe universel de constitution de tous les éléments de l'Univers, pensée humaine comprise. Il est la priorité de l'existence sur la conscience.

MATERIALISME DIALECTIQUE

Philosophie fondamentale du Marxisme-Léninisme, vision scientifique du monde, méthode générale de la connaissance du monde, science des lois les plus générales du mouvement* et du développement de la nature, de la société et de la pensée.

C'est un matérialisme* non réductionniste* focalisé sur la dynamique* et l'émergence*.

C'est un matérialisme qui reconnaît dans la matière* le seul constituant de l'univers, considérant la conscience* comme une propriété des formes hautement organisées de la matière et la fonction du cerveau de fournir un reflet* du monde objectif.

Le monde est la matière douée d'existence objective et formant une unité complexe interconnectée. Le mouvement est le mode même d'existence de la matière, si bien que, puisque le monde est dans un état de flux constant, il n'existe pas d'entités qui puissent être décrites comme véritablement statiques. Les modifications de la matière se produisent avec régularité selon des « lois ». Ces lois existent à différents niveaux correspondant aux domaines des différentes sciences, et il n'est pas toujours possible de réduire les lois d'un phénomène à un niveau donné à celles des phénomènes à un autre niveau (par exemple de réduire la biologie ou la sociologie à la physique). La matière a un nombre infini de qualités et de propriétés-elle est inépuisable. Il s'ensuit que la connaissance humaine est un reflet* de la matière objective dans la conscience, est nécessairement temporaire et incomplète. Aussi l'accumulation des connaissances se fait par l'accumulation de vérités relatives et non pas absolues. Le critère de la pratique – le succès ou l'échec de nos interventions dans le monde, montre si nos conceptions de ce monde sont adéquates ou non.

C'est une doctrine dialectique* car elle considère l'existence d'un lien marqué entre tous les éléments du monde, et envisage le mouvement et l'évolution du monde comme le résultat de l'existence de contradictions internes transcendées. Opérant à tous les niveaux de

la réalité, cette transcendance des conflits est la plus manifeste dans le domaine de l'histoire. Le matérialisme dialectique historique souligne les conflits inévitables entre les propriétaires des moyens de production et les travailleurs qu'ils exploitent.

Comme la philosophie du processus* c'est une doctrine émergentiste* qui distingue des niveaux différents dans la nature avec des passages dialectiques de l'un à l'autre sans phénomènes de réduction. Une doctrine qui proclame la loi du passage du quantitatif au qualitatif*.

Cette philosophie de la nature a été essentiellement élaborée par F. Engels* dans son ouvrage « Dialectique de la nature » en opposition à toutes les philosophies idéalistes* et tenue pour philosophie officielle dans le monde soviétique.

Les partisans du matérialisme dialectique ont entretenu de nombreuses polémiques philosophico-scientifiques portant sur les sciences les plus fondamentales comme la théorie de la relativité*, l'interprétation de la mécanique quantique*, les méthodes de la chimie théorique* (la querelle de la résonance*), la génétique* (transmission des caractères acquis, affaire Lyssenko) ou les mécanismes de la pensée* et de l'inconscient*. Ils se sont souvent opposés à des mouvements scientifiques où le primat de la matière n'était pas évident comme la cybernétique*, le structuralisme* ou la psychanalyse*.

Le matérialisme dialectique, fer de lance philosophique du marxisme*, s'affirme comme une vision du monde* et se constitue en philosophie naturelle*. Nulens, volens, le matérialisme dialectique incarne une bonne part de la philosophie naturelle au XX^e siècle. Il marque pour ainsi dire, l'apogée de la pensée atomistique, mécaniste et rationalisante qui domine l'occident des trois derniers siècles en exprimant l'idéologie matérialiste de la révolution industrielle. Il n'est pas absurde de considérer que le marxisme, critique du capitalisme, s'exprime en fait dans le même cadre idéologique que celui-ci. Comment pourrait-il en être autrement d'ailleurs ?. La critique ne peut vraiment s'exercer que dans un cadre de valeurs communes, sinon toute critique perd son sens de critique et n'est qu'un autre discours.

MATHEMATIQUES

Les mathématiques, ou la mathématique, c'est l'art de constituer des ensembles d'objets abstraits pour lesquels on va définir des opérations. Nombres ou figures sont des représentations abstraites des réalités, permettant une manipulation précise des objets. A vrai dire,

toute la mathématique n'est rien d'autre que le concept de nombre* dans son développement et dans tous ses détails.

Le but des mathématiques est d'éliminer l'ambiguïté inhérente à toute langue naturelle. C'est une langue artificielle construite pour révéler des relations entre objets indépendamment de leur nature particulière. Elle utilise des symboles* pour noter les concepts et s'exprime à l'aide de signes*, les signes mathématiques*. Ceux-ci appartiennent à trois catégories selon qu'ils représentent des objets, des opérations ou des relations.

La mathématique c'est la science des relations quantitatives et des formes spatiales du monde réel. C'est un langage qui s'impose à tous et ne souffre aucune interprétation. La vie de ce langage s'exprime par des extensions et des élargissements des concepts et des changements de points de vue qui les accompagnent.

Ainsi le nombre entier se trouve à la base de toute la mathématique et y introduit les opérations fondamentales d'addition et de soustraction. Une nouvelle opération, la division, permet d'introduire les nombres fractionnaires ou rationnels comme division d'un nombre entier par un autre. Si l'on introduit une relation d'ordre entre tous ces nombres, on peut repérer par des nombres les points d'une droite. Mais tous ces points ne remplissent pas la droite. Il faut compléter avec des points numérotés par des nombres dits irrationnels. Ainsi la racine carrée de 2 ou le nombre π qui exprime le rapport entre la longueur d'une circonférence et son rayon. L'ensemble de tous ces nombres le long de la droite est dit ensemble des nombres réels, pour les distinguer des nombres complexes* ou imaginaires qui repèrent les points du plan. La racine carrée de -1 en est un exemple. Ces nombres complexes peuvent être considérés comme des couples de nombres réels. On envisagera plus tard des objets qui sont des tableaux de nombres, les vecteurs* et les matrices* qui s'avèrent des opérateurs* sur les vecteurs*.

Au cœur de l'activité mathématique se trouve la démarche axiomatique*. Elle retient l'attention depuis Euclide* jusqu'à Bourbaki*. Ce dernier insiste non pas sur les objets mais sur les relations*. Il introduit ce faisant les structures algébriques, marques d'un structuralisme mathématique*. Mais l'axiomatique referme les mathématiques sur elles mêmes, ce que souligne le théorème de Gödel*.

Les mathématiques se développent souvent pour les besoins des théories scientifiques. La géométrie sur la sphère pour l'astronomie, l'analyse infinitésimale pour la mécanique, les équations différentielles* pour la physique des ondes, l'analyse de Fourier* pour

la résolution des équations différentielles linéaires et la théorie du signal*, l'algèbre linéaire* et l'analyse fonctionnelle pour la formulation de la mécanique quantique*, la théorie des groupes* pour la cristallographie* et pour la théorie des particules élémentaires* et des interactions fondamentales.

L'emploi de l'ordinateur* change beaucoup la pratique des mathématiques en permettant d'effectuer des calculs impossibles à réaliser à la main et en favorisant les méthodes numériques de résolution des équations différentielles*.

MATHEMATIQUES ET REEL

La Nature et la Vie ont du mal à s'accommoder de l'harmonie contraignante des mathématiques*. Y retrouver les structures, les principes universels, les harmonies sublimes est une affaire démesurée et décourageante.

C'est que l'image du monde que donnent les mathématiques est une image bien idéale, et l'on a bien du mal, à travers la douleur et le plaisir, le sexe et la mort, à faire coïncider cette image avec la réalité*.

MATIERE

Dans la philosophie antique, la matière a essentiellement le sens de matériau (chora réceptacle chez Platon) ou de substrat (hylé chez Aristote). Elle s'oppose conceptuellement à la forme* (idées platoniciennes ou forme aristotélicienne). Mais elle constitue avec la forme une entité inséparable: la substance*.

Aujourd'hui la matière désigne plutôt ce que l'antiquité appelait la substance*. Un atome c'est de la matière, mais c'est une substance au sens antique, car c'est ce qui fait que les choses sont comme elles sont (ousia*, quiddité*). Nous n'observons pas l'atome mais les propriétés de l'atome. Quant à la matière, au sens antique, son rôle serait joué par le Vide Quantique*.

Dans l'Antiquité dominant la matière informe et l'atome. La hylé d'Aristote n'est pas un donné perceptif ni une réalité objective, elle est un concept nécessaire à la compréhension du réel. La matière est le sujet logique et le substrat ontologique du changement, entre le non être (la privation) et l'être (la forme*). Elle est être en puissance, aspiration à être par la forme qui lui manque.

A l'Age classique la matière devient substance*. Dans les temps modernes la matière devient phénomène.

A la fin du XIX^e siècle la notion de matière subit une grave crise sous le double coup de la prééminence du concept d'énergie en physique et la réactivation d'un empirisme* radical en philosophie. D'une part en effet, l'école énergétiste anti-atomiste (Ostwald* et Duhem*) lutte pour une substitution du terme d'énergie à celui de matière, comme plus apte à rendre compte des phénomènes immatériels comme la lumière ou l'électricité. D'autre part, mais liés aux précédents, l'empiriocriticisme de Mach* réduit les objets matériels à des »complexes d'éléments de sensation «.

La matière en elle-même est une conception réaliste* qui sera combattue par les empiristes*.

Ainsi en 1829 le chimiste Chevreul*, dans ses « Leçons de chimie appliquée à la teinture » s'interroge sur les propriétés des corps.

« Qu'entend-on par propriétés de la matière, propriétés des corps ? Ce sont précisément les rapports que nous avons avec les choses qui tombent sous les organes de nos sens. En conséquence nous pouvons dire que les propriétés des corps sont les facultés qu'ils ont d'agir sur nous, et nous ajoutons, celles qu'ils ont d'agir les uns sur les autres. Mais quand nous nous apercevons de ce dernier genre d'action, c'est encore par l'intermédiaire de nos sens : en définitive c'est toujours par les rapports qu'ils ont avec nous que nous jugeons de leur existence. De là l'impossibilité de définir la matière en elle-même »

Une position qui culminera dans le machisme* combattu par le matérialisme* et le matérialisme dialectique*.

En 1927 le grand savant Weyl* s'interroge à l'ère de la physique quantique naissante dans un article célèbre « Was ist Materie ? »

Pour la physique contemporaine la matière est le résultat de l'excitation du vide quantique*, ce sont les champs* qui donnent naissance à la matière.

La matière s'entend au sens philosophique comme essentiellement opposée à la forme* (Aristote*) ou à la pensée (Descartes*). Au sens contemporain tout aussi philosophique que scientifique, la matière se voudrait distincte du champ. L'atomisme* est en un sens une doctrine qui distingue le champ et la particule. Mais dans la théorie quantique, forme moderne de l'atomisme, le champ se peuple de quanta, qui ne sont pas en général des objets locaux. La quantification du champ électromagnétique redonne à l'éther-champ

un statut d'éther-matière. Les photons appartiendraient-ils à la matière ?

MATIERE MAL ORGANISEE

MATIERE NOIRE

MATIERE PREMIERE

MATIERE SUBTILE (Encyclopédie. Article écrit par d'Alembert)

Matiere subtile

Matiere subtile, est le nom que les Cartésiens donnent à une matiere qu'ils supposent traverser & pénétrer librement les pores de tous les corps, & remplir ces pores de façon à ne laisser aucun vuide ou interstices entr'eux. Voyez Cartésianisme. Mais en vain ils ont recours à cette machine pour étayer leur sentiment d'un plein absolu, & pour le faire accorder avec le phénomène du mouvement, &c. en un mot, pour la faire agir & mouvoir à leur gré. En effet, s'il existoit une pareille matiere, il faudroit pour qu'elle dût remplir les vuides de tous les autres corps, qu'elle fût elle - même entierement destituée de vuide; c'est - à - dire parfaitement solide, beaucoup plus solide, par exemple que l'or, & par conséquent, qu'elle fût beaucoup plus pesante que ce métal, & qu'elle résistât davantage (voyez Résistance); ce qui ne sauroit s'accorder avec les phénomènes. Voyez Vuide.

M. Newton convient néanmoins de l'existence d'une matiere subtile, ou d'un milieu beaucoup plus délié que l'air, qui pénètre les corps les plus denses, & qui contribue ainsi à la production de plusieurs des phénomènes de la nature. Il déduit l'existence de cette matiere des expériences de deux thermometres renfermés dans deux vaisseaux de verre, de l'un desquels on a fait sortir l'air, & qu'on porte tous deux d'un endroit froid en un endroit chaud. Le thermometre qui est dans le vuide devient chaud, & s'éleve presque aussitôt que celui qui est dans l'air, & si on les reporte dans l'endroit froid, ils se refroidissent, & s'abaissent tous deux à peu pres au même point. Cela ne montre - t - il pas, dit - il, que la chaleur d'un endroit chaud se transmet à - travers le vuide par les vibrations d'un milieu beaucoup plus subtil que l'air, milieu qui reste dans le vuide après que l'air en a été tiré? & ce milieu n'est - il pas le même qui brise & réfléchit les rayons de lumiere? &c. Voyez Lumiere, Chambers.

Le même philosophe parle encore de ce milieu ou fluide subal, à la fin de ses principes. Ce fluide, dit - il, pénètre les corps les plus denses; il est caché dans leur substance; c'est par sa force & par son action que les particules des corps s'attirent à de très petites distances, & qu'elles s'attachent foitement quand elles sont contiguës; ce même fluide est aussi la cause de l'action des corps électriques, soit pour repousser, soit pour attirer les corpuscules voisins; c'est lui qui produit nos mouvemens & nos sensations par ses vibrations, qui se communiquent depuis l'extrémité des organes extérieurs jusqu'au cerveau, par le moyen des nerfs. Mais le philosophe ajoute qu'on n'a point encore une assez grande quantité d'expériences pour déterminer & démontrer exactement les loix suivant lesquels ce fluide agit.

On trouvera peut - être quelque apparence de contradiction entre la fin de cet article, où M. Newton semble attribuer à une matière subtile la cohésion des corps; & l'article précédent où nous avons dit après lui que l'attraction est une propriété de la matière. Mais il faut avouer que M. Newton ne s'est jamais expliqué franchement & nettement sur cet article; qu'il paroît même avoir parlé en certains endroits autrement qu'il ne pensoit. Voyez Gravité & Attraction, voyez aussi Ether & Milieu Étheré , au mot Milieu.

MATRICE (mathématique)

Tableau carré ou rectangulaire de nombres où l'on distingue les lignes des colonnes. Pour des matrices de mêmes dimensions on peut définir l'addition et la multiplication. Ces opérations ont de nombreuses propriétés de l'arithmétique à cette différence fondamentale près que le produit matriciel n'est pas commutatif. Des matrices à une ligne ou à une colonne sont des vecteurs. Les matrices générales sont des tenseurs*

La matrice d'un opérateur linéaire est une matrice représentant un opérateur* dans une base de l'espace vectoriel sur lequel il agit. Pour l'obtenir il faut faire agir l'opérateur sur les vecteurs de la base et écrire comme une colonne de la matrice les coordonnées des vecteurs obtenus. Ainsi la matrice d'un opérateur est analogue aux coordonnées d'un vecteur. Les opérateurs se présentent ainsi sous forme de matrices ce qui permet de donner un aspect opérationnel aux calculs de l'algèbre linéaire*. L'action d'un opérateur sur un vecteur se présente comme un produit de matrices.

Dans sa première formulation de la M.Q. Heisenberg utilisait cette représentation au point d'appeler sa théorie mécanique des matrices.

MATRICE DENSITE (Opérateur densité en mécanique quantique*)

Représentation matricielle de l'opérateur densité*, correspondant à tout état de la mécanique quantique. C'est la représentation la plus générale d'un état, valable pour les états purs comme pour les états mixtes. Cet opérateur permet de calculer la valeur moyenne de toute observable dans l'état en prenant la trace du produit de l'opérateur(observable) par l'opérateur densité. Prendre la trace signifie en représentation matricielle faire la somme de tous les éléments diagonaux de la matrice.

MAXWELL (EQUATIONS DE)

Les équations de Maxwell, mises sous forme canonique par Lorentz, sont les équations fondamentales de l'électrodynamique de Maxwell*. Etablissant les liens entre l'intensité du champ électrique et magnétique et la distribution dans l'espace des charges électriques et des courants, elles constituent les postulats de base de l'électromagnétisme*

Ces équations traduisent sous forme locale différents théorèmes (Gauss, Ampère, Faraday) qui régissaient l'électromagnétisme avant que Maxwell ne les réunisse. Elles donnent ainsi un cadre mathématique précis au concept fondamental de champ* introduit en physique par Faraday dans les années 1830.

Ces équations montrent notamment qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, alors qu'ils ne le sont pas en régime variable. Dans le cas le plus général, il faut donc parler du champ électromagnétique, la dichotomie électrique/magnétique étant une vue de l'esprit. Cet aspect trouve sa formulation définitive dans un formalisme plus général: le champ électromagnétique y est représenté par un être mathématique unique de type tenseur*, le « tenseur de Maxwell », dont certaines composantes s'identifient à celles du champ électrique* et d'autres à celles du champ magnétique*.

MECANICISME (A distinguer de Mécanisme*)

Conception considérant les formes mécaniques du mouvement de la matière comme un principe universel d'explication de la Nature. Cette conception est liée aux succès de la Mécanique Classique aux XVII ème et XVIII ème siècles (Galilée*, Newton*, Laplace*). Elle subit des échecs dans l'Electromagnétisme à la fin du XIX ème siècle, avec essentiellement, la faillite de la notion d'éther*. Mais elle revient

en force avec le renouveau de la Mécanique lié à la Théorie des Systèmes Dynamiques_* (Néomécanisme*).

Dans son contenu le mécanicisme a des faces multiples. Cartésien, il admet seulement étendue et mouvement. Newtonien, il inclut la force. Atomiste, il devient soucieux de représenter les caractéristiques des diverses particules. Electrodynamiste enfin, il essaie de justifier, au moyen d'un éther peu vraisemblable, un formalisme simple et abstrait.

Le mécanicisme est un idéal de description par figures et mouvement. Le mécanicisme suppose une conception dualiste de la nature, celle là même qui permettait à l'ancien atomisme de construire une description du mouvement des atomes à partir du « vide » et du « plein ». L'une et l'autre de ces données semblent nécessaires pour justifier l'existence même du mouvement et de ses propriétés. Celles ci disparaîtraient si nous ne distinguons l'espace vide de son contenu matériel.

Le mécanicisme est porteur d'une vision réductionniste du monde. Sa doctrine principale est la décomposition des systèmes complexes en parties simples dont le mouvement mécanique explique le comportement du tout. Le plus grand succès du mécanicisme est dans la résurrection de l'atomisme* et son triomphe, qui ne nécessitera pas moins que tout le XIX^e siècle. De ce lien avec l'atomisme le mécanicisme tire une position avant tout réaliste*. Il admet que la physique repose sur la considération d'éléments objectivement représentables. L'explication mécanique en ce sens s'oppose à la méthode qui se contente d'établir entre les phénomènes des relations fonctionnelles abstraites telle qu'elle est définie par Duhem*. Le mécanicisme est fondamentalement anti positiviste*, anti instrumentaliste*, anti opérationnaliste*. Le déclin historique du mécanicisme a marqué un regain du positivisme* au tournant des XIX^e et XX^e siècles.

A des degrés divers la Relativité* s'inscrit dans le prolongement de la mécanique classique, en se bornant à donner une nouvelle représentation de l'espace*, l'espace-temps* éventuellement courbe. Bien entendu, la conception du champ* née du développement de l'électrodynamique s'est, entre temps, interposée entre le vide* et le plein. Elle cherche un moment à se donner une substance à travers la notion d'éther*. Face au vide, le champ et ses sources se présentent comme des données matérielles irréductibles l'une à l'autre. Mais le vide lui même perd son indépendance au profit de l'espace-temps courbe influencé par la matière de la relativité générale. Tout en

prenant un autre aspect, la description par figures et mouvement ne perd pas ses droits.

C'est la mécanique quantique* qui va abandonner définitivement toute référence au mécanisme, ce qui la rendra difficilement compatible avec la relativité, et explique les difficultés pour produire une théorie quantique de la gravitation (gravitation quantique*).

MECANIQUE CELESTE

MECANIQUE CLASSIQUE

Théorie physique et mathématique établissant les lois du mouvement des corps macroscopiques qui se déplacent à des vitesses bien inférieures à celle de la vitesse de la lumière*. Elle est fondée sur les trois lois de Newton* (1687) :

Loi d'inertie : si d'autres corps n'agissent pas sur un corps donné, celui-ci se trouve dans un état de repos ou en mouvement rectiligne uniforme.

Loi fondamentale de la dynamique : le produit de la masse par l'accélération est égal à la somme de toutes les forces* agissant sur le corps.

La réaction est toujours égale à l'action. Deux points matériels agissent l'un sur l'autre par des forces égales mais opposées, agissant selon la droite qui les joint.

La reformulation mathématique de la loi fondamentale de la dynamique au moyen de principes variationnels* a fourni un cadre qui permet la mise en œuvre de la mécanique classique dans de nombreux domaines de la physique théorique*. Dans ce cadre, celui de la mécanique analytique*, il apparaît clairement que le mouvement est défini par le couple position-impulsion* dans l'espace de phase*, et caractérisé par une fonction de l'énergie cinétique* et de l'énergie potentielle* qui s'introduit dans les principes variationnels : fonction lagrangienne (lagrangien*) ou fonction hamiltonienne (hamiltonien*, mécanique hamiltonienne*).

La mécanique de Newton, la mécanique analytique* (mécanique lagrangienne* et mécanique hamiltonienne*) sont à l'évidence des conceptions théoriques concurrentes, non totalement équivalentes du

point de vue empirique et sémantique ; ce sont des langages différents pour l'expression d'un même contenu, celui des phénomènes mécaniques en l'absence de frottement*.

Servant de cadre de référence à toute la physique , la mécanique classique a été l'objet de nombreuses formulations et reformulations de la part des physiciens de la fin du XIX^e siècle, Hertz* , Mach* et Planck*. Ce dernier voulait fonder la mécanique classique sur le principe de conservation de l'énergie*.

MECANIQUE HAMILTONIENNE

MECANIQUE QUANTIQUE (M.Q.)

Le comportement des particules élémentaires* (électron*, proton*, neutron*.....), des atomes* et des molécules*, ne peut pas être en général décrit par la mécanique classique et la théorie électromagnétique classique. Une nouvelle théorie est nécessaire pour décrire ce que l'on désigne par physique quantique* en l'opposant à la physique classique*. C'est la Mécanique Quantique.

Ce qui change dans le passage des théories classiques aux théories quantiques, ce ne sont pas tant les lois et les équations, que la conception même des propriétés observables.

Si la position dans l'espace et la vitesse d'un corps semblent naturellement définis en mécanique classique, et constituent des attributs* de ce corps, attachés au corps en l'absence d'observation, il n'en est plus de même en M.Q. Il n'y a plus que des propriétés observables (observables*), définies dans le cadre des conditions d'observation (Contextualisme en M.Q.*). Ces propriétés sont obtenues par une mesure*. Ces propriétés ne sont plus de simples données sensibles que l'on se borne à enregistrer telles quelles, mais sont le résultat d'une action expérimentale exercée sur le système. Les propriétés* ne sont pas des attributs*. Ceci provient de ce que la Mécanique Quantique repose avant tout sur une distinction entre un domaine microscopique (l'objet quantique*) et un domaine macroscopique auquel appartiennent les résultats des expériences (observations) effectuées sur l'objet quantique* microscopique. Cet aspect dualiste* est l'essence même de la présentation standard, dite interprétation de Copenhague*.

La Mécanique Quantique est une doctrine des observations macroscopiques sur des objets microscopiques.

Mais il ne faut pas penser que la M.Q. a été construite par un examen détaillé des dispositifs expérimentaux. Elle résulte comme toujours d'un coup de force théorique qui instaure une certaine cohérence mathématique. Ce coup de force réside dans la définition de la mesure comme acte créateur de l'observable macroscopique. La mesure ne constate pas des attributs, elle a pour fonction de faire apparaître des propriétés macroscopiques (classiques) observables. Le rapport à l'expérience ne vient souvent que bien plus tard. En fait la M.Q. a été bâtie sur des expériences de pensée dont la réalisation commence à peine. Aussi la M.Q. nomme observables* des quantités physiques observables en droit mais pas nécessairement observables en fait.

C'est à l'examen de la structure mathématique de l'opérateur* qui représente l'observable* que sera consacrée la majeure partie de la M.Q. Donner un objet quantique* c'est donner un opérateur spécifique, en général celui correspondant à l'énergie. Tout en M.Q. tourne autour de la définition spécifique des observables et de leur structure mathématique.

La Mécanique Quantique ne révèle pas la structure du système physique, mais la structure de l'ensemble des actions et des réponses possibles.

La M.Q. se présente comme une "boîte noire*", permettant le calcul des sorties (résultats des observations, mesures*) correspondant à des entrées (conditions expérimentales, préparation du système), grâce à la connaissance de l'état * de la boîte noire. Les dispositifs de mesure* et de préparation* sont en partie inclus dans la boîte noire assurant ainsi le contact du macroscopique et du microscopique

Toute la polémique géante sur l'interprétation* de la M.Q. porte en définitive sur le statut et le contenu de cette boîte noire. Bohr* et l'Ecole de Copenhague prétendent que l'on ne pourra jamais ouvrir la boîte et qu'il n'y a aucune réalité au delà de ce que raconte la M.Q. Bien des physiciens contemporains espèrent au contraire que l'on pourra ouvrir la boîte, mais pensent que l'on y trouvera un être nouveau non descriptible par la mécanique classique. C'est avec cette idée en tête que l'on propose des reformulations de la boîte noire, dites interprétations de la mécanique quantique*. Le problème est de savoir si la boîte noire est dans la Nature ou dans notre tête. La M.Q. est elle un "Comme ça" ou un "Comme si"?

Dans ces conditions, la M.Q. formalise mathématiquement deux faits fondamentaux de la connaissance de la Nature*:

A une même interrogation expérimentale sur un objet quantique*, correspondent en général de nombreuses réponses possibles, qui apparaissent au hasard* et peuvent être affectées de probabilités*.

Mais il n'est pas facile de dire, sans ouvrir la boîte noire, si le Hasard est dans le système ou n'apparaît que lors de l'interaction du système avec le dispositif expérimental.

Il existe des classes distinctes de propriétés qui ne sont pas observables simultanément, dans une même mesure*. C'est le principe de complémentarité* de Bohr.

Ainsi, par exemple, la propriété position et la propriété vitesse appartiennent à deux classes d'observables non-compatibles*, dites aussi complémentaires. Cela signifie que dans une mesure qui donnerait un résultat macroscopique pour la position, le même résultat pour la vitesse ne peut être obtenu.

En fait la mécanique quantique est une généralisation de la théorie des probabilités permettant de prendre en compte des observables non compatibles. Ce n'est pas une généralisation de la mécanique classique, qui en ferait une théorie physique en soi.

La Mécanique Quantique décrit non pas l'être* du système mais son état*.

Description mathématique abstraite qui permet de calculer, connaissant l'état* (en fait un vecteur), les probabilités des réponses du système aux actions expérimentales. Mais l'existence de classes d'observables non compatibles* donne au calcul des probabilités de la M.Q. une structure mathématique différente de celle du calcul classique des probabilités. Cette structure prend en compte un troisième fait fondamental de la connaissance de la Nature*:

Les observables non-compatibles* ne sont pas indépendantes.

Il y'a entre l'observation de la position et l'observation de la vitesse un lien physique profond.

C'est cette non indépendance qui se manifeste dans les fameuses relations d'incertitude de Heisenberg*. Elles impliquent que l'état n'est pas fonction de la position et du moment mais de la position seule ou du moment seul. L'état pourra donc être fonction de la position seule ou du seul moment, ces deux fonctions étant reliées (par transformation de Fourier*) car elle contiennent la même information.

L'appareil mathématique de la mécanique quantique s'adapte parfaitement à l'ensemble des contraintes expérimentales. Ce n'est pas une description de fait du comportement du système microphysique mais une « spéculation » sur les états de possibilité du système, formalisée par la représentation des états* comme vecteurs d'un espace vectoriel*, où l'addition des états (principe de superposition des états*) joue le rôle central d'addition des possibilités (probabilités quantiques*), tant que les conditions physiques le permettent (cohérence*, décohérence*). La mécanique quantique se coule dans le formalisme des espaces vectoriels avec toute sa richesse (dualité* et action des opérateurs* linéaires). Une observable ne peut prendre comme valeurs que les valeurs propres* de l'opérateur qui la représente (quantification*). Cette structure de la boîte noire introduit ce que l'on peut considérer comme un réalisme structural*

Rarement une théorie physique aura trouvé comme moule une théorie mathématique aussi abstraite, dont chaque constituant trouve une interprétation physique précise. Tout un théâtre mathématique où la physique trouve son compte. L'ensemble des observations d'un système microphysique possède une structure mathématique. C'est la mécanique quantique.

L'interprétation physique de la dépendance des observables est à nouveau délicate en l'absence d'ouverture de la boîte noire. On peut cependant rapprocher cette propriété de l'apparition pour les objets quantiques* de phénomènes en tout point semblables à ceux produits par des ondes classiques (interférence*, diffraction*.....), révélant le caractère complexe des "propriétés" de l'objet. On est en présence là de la manifestation du "dualisme onde-corpuscule*", lien indissoluble entre des propriétés corpusculaires et des propriétés ondulatoires, inscrit mathématiquement dans la M.Q. à travers la transformation de Fourier* qui relie entre elles la distribution de probabilité de la position et celle du moment. Toute l'information sur la distribution de probabilité du moment est contenue dans la distribution de probabilité de la position. La M.Q. calcule les phénomènes optiques observés pour les particules à l'aide de la représentation mathématique de l'état,

fonction à valeurs complexes comportant donc un facteur de phase* et appelée pour cette raison fonction d'onde*. Les interférences apparaissent du fait que l'addition de deux états* donne encore un état possible du système (Superposition* des états en M.Q.) (Linéarité* de la M.Q.).

Les phénomènes "ondulatoires" de la physique quantique peuvent aussi être interprétés comme la manifestation d'une onde associée à toute particule: l'onde de de Broglie*. Mais cette onde n'a jamais été surprise expérimentalement (pas plus que l'onde électromagnétique d'ailleurs) et appartient jusqu'à nouvel ordre à l'univers qui se trouve à l'intérieur de la boîte noire.

La non-indépendance des observables non-compatibles* a de multiples conséquences, dont la plus importante est que l'on ne peut surprendre un système quantique dans une situation où toutes les réponses aux interrogations du physicien aient des valeurs certaines et à fortiori désespérément nulles.

On ne peut donc pas totalement réduire le hasard quantique. Si l'on comprime le hasard dans une classe d'observables, il se déchaîne dans la classe complémentaire. C'est ce qui exclut le repos absolu et le vide absolu.

Les trois faits majeurs de la mécanique quantique, qui en soulignent la spécificité et la distinguent de la mécanique classique, sont la quantification*, le dualisme onde-corpuscule* et l'enchevêtrement*. Trois faits qui s'expriment dans le langage de l'état* comme l'existence d'un état fondamental* et d'états excités*, comme propriété des superpositions d'états*, et comme l'existence d'une forme d'état qui assure la stabilité de la matière et autorise des corrélations à grande distance.

En fait la mécanique quantique, repose, outre la représentation des observables par des opérateurs* et la définition de l'état comme vecteur d'un espace de Hilbert*, sur trois grands principes concernant les états :

Le principe de superposition des états*

Le principe de symétrisation des états de n particules identiques indiscernables*, créant des états enchevêtrés*

Le principe selon lequel les états des systèmes fermés* sont solutions de l'équation de Schrödinger*.

On ne peut qu'être frappé par la grande cohérence mathématique et l'extraordinaire accord avec les faits expérimentaux de l'ensemble de la mécanique quantique. C'est cette cohérence, qui se

dégage peu à peu, qui permet de formuler la mécanique quantique de manière axiomatique* (Cf. Axiomatique quantique*), en se fondant sur certaines propriétés qui en condensent l'esprit, comme par exemple la non duplication de l'état* ou une logique quantique* propre.

Le raton laveur* considère que la mécanique quantique met une jupe à un âne pour en prévoir mieux les ruades (Cf. Interprétation de la mécanique quantique par le raton laveur*)

La mécanique quantique a permis non seulement d'interpréter d'immenses zones de la physique*, de la chimie* ou même de la biologie*, mais elle conduit à des applications multiples qui constituent le fondement des technologies de la fin du XX ème siècle. Il apparaît une Technologie Quantique* à laquelle la conception du Vide Quantique* apporte sa contribution.

MECANIQUE QUANTIQUE ET ESPRIT

La mécanique quantique étant notre théorie fondamentale de la matière, toute théorie réductionniste* de l'esprit* et de la conscience* se doit de chercher quel rôle la mécanique quantique peut jouer dans ce domaine.

Une problématique qui s'inscrit dans le vaste débat philosophique et scientifique de la nature de l'esprit et du rôle de l'esprit dans la nature. Elle s'inscrit parfaitement dans la tradition dualiste* occidentale de la séparation entre l'esprit* (res cogitans cartésienne) - ici la représentation mentale du monde extérieur- et le monde matériel dont le corps fait partie (res extensa). Tout en ne négligeant pas une définition plus large de l'esprit telle qu'on la trouve dans le panpsychisme* ou l'unus mundus*.

Cette difficulté à définir l'esprit introduit dans le débat une dimension sociologique et historique où chaque époque cherche à attribuer à l'esprit les propriétés et les qualités qui découlent des théories scientifiques dominantes. De nos jours les neurosciences théoriques tablent principalement sur l'activité non linéaire du cerveau et s'appuient sur la théorie des système dynamiques*. Formes* de non équilibre*, bifurcations* et synchronisation* en sont les concepts clés à l'œuvre. A côté de cette fertilité prometteuse le rôle de la mécanique quantique en biochimie et biologie quantique* s'avère bien plus stérile.

Et pourtant le caractère tout à fait original de la théorie quantique, dont les tenants et les aboutissants étranges restent matière à des interprétations* variées, incite certains à établir des ponts avec une connaissance partielle des manifestations de l'esprit. Il faut se méfier de ces ponts établis le plus souvent sur des correspondances linguistiques et métaphoriques. Il y a de nombreuses discussions sur les rapports entre mécanique quantique et conscience qui adoptent les idées fondamentales de la théorie quantique de manière purement métaphorique. Des termes quantiques comme superposition*, complémentarité*, effondrement*, enchevêtrement* sont utilisés en dehors de leur définition précise et complètement hors du contexte de leurs applications habituelles. Ainsi par exemple les actes conscients sont postulés analogues à des actes de mesure* et les corrélations dans les systèmes psychologiques sont postulées comme interprétable en tant qu'enchevêtrement. La voie métaphorique s'engouffre en général par l'attribution d'un rôle physique direct à des concepts de la théorie quantique qui ne sont que des objets mathématiques, intermédiaires de calcul. C'est un détournement de la théorie, au mieux une interprétation injustifiée. Ceci fournit d'admirables thèmes pour la science-fiction ce qui n'exclut pas des inspirations pour des travaux futurs. Mais ces travaux n'existent pas en dehors de vagues métaphores ou analogies. Des écrits prétendant que la mécanique quantique explique la conscience ou les états modifiés de conscience du chamanisme sont de pures escroqueries intellectuelles.

La mécanique quantique est une orfèvrerie mathématique si particulière et si spécifique qu'il paraît tout à fait invraisemblable qu'elle puisse concerner un phénomène complexe et mal défini comme l'esprit. Le comportement quantique est fragile dès que plusieurs objets quantiques interagissent :c'est la décohérence*. Qui a jamais écrit une équation de Schrödinger du cerveau pour déterminer les états de conscience possibles ?

Un des concepts nouveaux de la M.Q est celui d'observateur*. La M.Q. est un langage macroscopique sur un monde microscopique et l'observateur est un passeur de l'un à l'autre. A la différence de la plupart des théories physiques classiques la mécanique quantique fait explicitement intervenir dans sa formulation un agent extérieur à l'objet quantique* qu'elle nomme l'observateur* qui effectue une mesure*.

Le rôle de l'observateur en mécanique quantique est purement technique et se trouve dénué de toute prétention métaphysique faisant appel à sa conscience.

Pourtant certains des pères fondateurs de la M.Q. se sont laissés aller à invoquer la conscience de l'observateur dans l'acte de mesure* qui « perturbe » l'objet quantique. John von Neumann*, dont le génie a permis d'asseoir la MQ sur une solide base mathématique, en est arrivé à la conclusion simple mais lourde de conséquences qu'*il n'est pas possible de formuler les lois de la mécanique quantique de manière complète et consistante sans se référer à la conscience humaine*. Action de la conscience sur la matière ? Comme la seule réalité devient donc la perception qu'on en a, y' a-t-il un moyen de savoir que cette perception a un objet distinct d'elle? Cet empirisme* extrême débouche sur un solipsisme*. London et Bauer, puis Wigner* ont défendu ce point de vue.

Cette solution rencontre toutefois un certain nombre de difficultés. Tout d'abord, elle introduit un dualisme gênant : à côté des objets du monde physique, existeraient des consciences qui n'en feraient pas partie mais seraient cependant susceptibles d'avoir une action directe sur les objets physiques. La nature de cette action paraît pour le moins mystérieuse. On se rappelle que Descartes avait défendu une position analogue qui a été abandonnée depuis longtemps. Ensuite, surgissent un grand nombre de questions étranges : si c'est la prise de conscience qui crée la valeur de la grandeur physique — comme, par exemple, la position d'une particule — que vaut la grandeur si personne n'observe ? Si on répond que la grandeur n'a aucune valeur, alors il faut en conclure que la lune n'avait aucune position définie avant que quelqu'un ne l'observe ! Qu'en est-il de l'univers avant l'apparition d'êtres conscients ?

En fait la MQ ne définit que la connaissance de l'objet quantique* à l'aide d'un objet mathématique l'état*, et la mesure modifie l'état, c.a.d. la connaissance, ce qui semble naturel. Mais la conscience n'a rien à voir là dedans, car la mesure n'est que l'obtention d'une trace physique du monde microscopique dans le monde macroscopique par des procédures réalisées expérimentalement. La mécanique quantique n'est pas une ontologie* de l'objet quantique, cependant cette ontologie se manifeste dans le dualisme onde corpuscule et dans la nature étrange du calcul de probabilités quantique*. Tout l'appareil mathématique de la M.Q. est le reflet de ces deux caractéristiques.

Une autre démarche reliant la matière et l'esprit est celle de Pauli* et Jung*. Carl Gustav Jung, célèbre psychologue, élève dissident de Freud, et Wolfgang Ernst Pauli, prix Nobel de physique en 1945, deux géants du siècle dernier qui, par leurs échanges, ont tenté de découvrir ce point d'unité dans le réel, où la *connaissance*

scientifique objective de la nature à travers ses règles et ses lois, et la *connaissance intérieure de la psyché* et des manifestations de l'inconscient, trouveraient une source ou une structure communes: *l'Unus mundus*. C'est à la suite de sa rupture avec Freud, que Jung concentra ses recherches sur l'esprit et l'inconscient dans lesquels, au plus profond, lui apparaît un fondement universel à l'origine de la *matière* et de l'*esprit*. Cette intuition sera étayée par la lecture de textes anciens, ses recherches sur l'alchimie, et par l'analyse des rêves de ses patients. Pauli, quant à lui, démontra l'existence d'un modèle abstrait, caché sous la surface de l'atome et déterminant son comportement d'une manière non causale. Il y'avait là, matière à développer de fructueux échanges entre les deux hommes. La rencontre se produisit par le fait que Pauli suivit dans les années trente une cure analytique avec l'un des élèves de Jung, cure dont Jung lui-même étudiera la série de rêves (cf. *Psychologie et Alchimie*). Ce que l'on savait moins jusqu'ici, et que l'on peut découvrir dans *Wolfgang Pauli / C.G. Jung - Correspondance 1932-1958*, c'est que les relations de Pauli avec Jung se sont étalées sur un quart de siècle, jusqu'à sa disparition en 1958. A partir de leur correspondance, on constate que Pauli a eu une participation décisive pour le développement de l'idée de *Synchronicité** : « *une occurrence simultanée de deux événements liés par le sens et non par la cause* ». Pauli s'intéresse à l'alchimie* et aux philosophies néo-platoniciennes*, Jung s'initie à certaines conceptions de la physique moderne, cette recherche à deux voies, complémentaire et réciproque, représente au final l'une des entreprises scientifique et philosophique les plus originales et les plus audacieuses du siècle dernier. Le problème de la complémentarité entre *psyché* et *matière*, signalé plusieurs fois par Pauli, est aujourd'hui reformulé par la vision moderne de la physique quantique. Étant donné que la partie matérielle de l'*unus mundus* peut être décrite correctement par la mécanique quantique, il est concevable de supposer que les structures les plus fondamentales de cette théorie puissent avoir une validité en dehors du domaine matériel. Pour Jung avec la disparition de l'alchimie, l'unité symbolique de l'esprit et de la matière s'est défaite et, par suite, l'homme moderne se trouve déraciné et étranger dans une nature privée de son âme" . Matière et esprit, matière et psyché sont ressentis et conçus comme n'ayant rien en commun (voire l'esprit est pensé comme étant produit par des processus de nature matérielle), et la causalisme de la vision scientifique du monde exigeant en outre une stricte séparation des phénomènes, on perçoit de plus en plus difficilement la "corrélation universelle" des événements, c'est-à-dire "l'unité du monde"

Sur les rapports entre l'esprit et la matière, la plupart des physiciens ne se prononcent pas et se contentent de constater la validité de la physique quantique. Un courant à part, en particulier représenté par David Bohm, suppose la présence d'une réalité plus profonde et inconnaissable dont la matière et l'esprit ne seraient que deux manifestations complémentaires. Ses théories sont compatibles avec le principe de non séparabilité, c'est-à-dire que des particules non contiguës dans l'ordre explicite le sont dans l'ordre implicite. David Bohm considère que l'esprit et la matière sont interdépendants et reliés, mais non pas causalement connectés. Ils sont mutuellement des projections enveloppantes d'une réalité élevée qui n'est ni la matière ni la conscience. L'ordre implicite (ou implié) est au-delà de l'espace-temps. C'est un vide plein de toutes les potentialités. C'est le monde comme il est. L'ordre explicite, manifeste, déployé, est l'univers tel qu'il nous apparaît, articulé autour de l'espace-temps, mais créant une réalité qui nous semble séparée et indépendante. Ainsi, selon David Bohm, *« nous nous accrochons dans une large mesure au monde manifeste considéré comme la réalité fondamentale où l'important consiste à disposer d'unités séparées, relativement tout au moins, mais en interaction. Dans la réalité non manifeste tout s'interpénètre, tout est interrelié »*. L'espace-temps de l'ordre explicite se développe à partir de l'ordre implicite. Tout comme la lumière et les ondes radio ont leur fondement dans un ordre commun, la conscience et la matière sont réunis au-delà de leur ordre implicite respectif, dans l'ordre super implicite. Cet ordre super-implicite est un univers auto-organisé dans lequel la conscience et la matière sont indissociables. L'ordre super-implicite est le fondement du monde dont il assure la cohérence. Les objets en mouvement, reliés par des champs, apparaissent dans l'ordre explicite, dans un référentiel espace temps, mais ce qui nous apparaît est sous tendu par un ordre implicite voilé. Puisque nous sommes immergés dans l'espace-temps, nous ne pouvons dévoiler le réel. Le réel nous est voilé (d'Espagnat), il est connaissable seulement en certaines de ses structures, et on ne peut que partiellement l'appréhender. Le réel voilé se situe au-delà des phénomènes. Le réel en soi, ou l'ordre implicite, est différent de notre monde quotidien. Le concept de la vitesse n'a plus de sens. C'est un espace multidimensionnel où le temps ne s'écoule plus : il y a instantanéité de tous les événements, il n'y a ni passé, ni présent, ni futur. Il n'y a plus de causalité mais information pure et synchronicité. Ce réel voilé se projette dans notre univers que nous expérimentons quotidiennement et notre cortex construirait une apparence structurée sur l'espace-temps et le principe de causalité. Cependant, parfois, notre inconscient

serait le canal récepteur de l'intuition de l'unité de notre univers par le biais par exemple des expériences de synchronicité qui représentent un temps acausal où il n'y a ni passé ni futur. Dans l'ordre implicite, tous les événements sont repliés dans une totalité dont on ne peut rien dire et qui sous-tend l'ordre explicite. Selon David Bohm, cette totalité inconnaissable (comme le savoir absolu de Jung, ou le Réel de Lacan) en perpétuel mouvement se manifeste à la manière d'un hologramme : c'est ce qu'il définit par Holomouvement. Il y a continuellement un processus de projection et d'introjection entre l'ordre implicite et l'ordre explicite. Les particules sont continuellement en déploiement dans l'ordre explicite ou en involution dans l'ordre implicite. Tout ce que nous venons de voir s'appuyer sur une conception vague de l'esprit et de la conscience. Il s'agit là de discours à caractère philosophique et non pas de théories scientifiques avérées. Il y règne une espèce de panpsychisme*. Celui-ci prône en effet que l'esprit est partout dans le monde et que tous les objets ont de l'esprit. Le panpsychisme n'est pas une théorie formelle de l'esprit. C'est une conjecture sur l'extension du phénomène de l'esprit dans l'univers

D'autres approches utilisent la théorie quantique actuelle pour modéliser concrètement des mécanismes physiologiques et psychologiques associés à la conscience. Par exemple, Beck et Eccles ont suggéré dans les années 1990 que le caractère probabiliste de la relâche des vésicules de neurotransmetteurs dans la fente synaptique serait d'origine quantique. Pour eux, la taille extrêmement petite des sites où se fait l'exocytose des vésicules synaptiques contenant les neurotransmetteurs permettrait à l'incertitude quantique d'y jouer un rôle. Eccles décrit des structures appelées « dendrons » formées de groupes d'une centaine de dendrites de neurones pyramidaux du cortex. La conscience agirait en liant réciproquement chaque dendron à l'unité d'expérience mentale, ou « psychon », qui lui est associé. Et c'est l'action du psychon sur les dendrons qui provoquerait l'augmentation de la probabilité de relâche des vésicules synaptiques dans les synapses excitatrices de ces dendrites. Comme on peut le constater, il s'agit d'une hypothèse dualiste en ce qu'elle suppose deux mondes distincts. La physique quantique au niveau des vésicules synaptiques joue ici un peu le rôle de la glande pinéale de Descartes, c'est-à-dire le lieu d'interaction entre les deux mondes. Il n'est pas inintéressant de rappeler que, bien qu'il ait reçu le prix Nobel de médecine en 1963 pour ses importantes découvertes sur les mécanismes synaptiques, Eccles était un catholique pratiquant qui n'a jamais caché sa foi en une âme humaine d'origine divine.

Il n'ya donc rien de bien convaincant dans les discours sur les rapports entre la mécanique quantique et l'esprit. Comme pour les rapports entre la mécanique quantique et la théorie de la gravitation*, on a affaire à des discours situés à deux niveaux différents. La MQ a un caractère épistémique*. C'est une théorie de l'observation de l'objet quantique. Notre connaissance de l'esprit se veut ontologique* et s'insère mieux dans le cadre de l'étude des systèmes complexes* et de la dynamique non linéaire*.

L'intérêt du grand public pour les rapports entre la mécanique quantique et l'esprit date du fameux Colloque de Cordoue*.

Evènement s'il en faut, prouvant qu'il n'y a pas divorce réel entre la science* et le mythe*. Selon leurs convictions religieuses ou l'atmosphère culturelle dans laquelle ils évoluent les physiciens se laissent parfois aller à des dérives spiritualistes, introduisant par là l'idéologie* dans la science. Et les médias de donner à ces dérives une résonance répondant à l'attente d'un public prêt à toutes les aventures ésotériques*.

MECANIQUE QUANTIQUE ET GEOMETRIE

MECANIQUE QUANTIQUE (Histoire de la naissance)

Le 7 juin 1925 Werner Heisenberg* se rendit dans l'île de Heligoland pour trouver du repos après un accès de rhume des foies. A cette époque il travaillait sur les lignes spectrales de l'hydrogène, essayant de trouver une manière consistante de les calculer. Ce problème l'obsédait au point de ne pas dormir. C'est une de ces nuits là qu'il inventa la mécanique quantique.

Le 9 Juin Heisenberg rentra à Göttingen et envoya une copie de ses résultats à Pauli* avec une lettre d'accompagnement disant que pour lui tout restait vague, mais qu'il semblait que les électrons ne se déplaceraient plus jamais sur des orbites.

Le 25 juillet l'article annonçant l'invention de la mécanique quantique est reçu par le Zeitschrift fur Physik. Heisenberg en avait auparavant envoyé une copie à Max Born* en disant que son article était de la folie, qu'il n'osait pas l'envoyer pour publication. Born fut d'abord complètement étonné par l'étrangeté des calculs. Mais au matin du 10 Juillet Born réalisa soudain que les calculs de Heisenberg relevaient du calcul matriciel qu'il avait lui-même utilisé pour l'étude des vibrations du solide. Avec un de ses élèves, Pascal Jordan*, Born reformula les résultats de Heisenberg dans un langage matriciel formel

donnant naissance à la première formulation abstraite de la nouvelle mécanique quantique.

Il est étonnant de savoir que peu après, Born reçut la copie d'un article écrit par un jeune physicien anglais inconnu, Paul Adrien Dirac, contenant de nombreux résultats qu'il venait d'obtenir avec Jordan. Dirac introduisait un langage mathématique plus abstrait que la mécanique des matrices, ouvrant la voie à la formulation abstraite de Von Neumann* en terme d'opérateurs sur un espace de Hilbert*.

Lorsque Heisenberg écrivit le premier article sur la mécanique quantique il ne connaissait pas la mathématique des matrices mais il s'y initia rapidement et commença à élaborer les aspects mathématique de sa théorie en collaborant avec Born, Jordan et Pauli. A la fin de 1925 Pauli obtint pour la première fois la formule de Balmer complète pour l'atome d'hydrogène. Au cœur de sa théorie se trouvait l'idée que les observables sont représentées par des matrices dont la commutativité joue un rôle essentiel. La non commutation des matrices jouera un rôle central dans la dérivation du principe d'incertitude* par Robertson.

Erwin Schrodinger en 1926 ignorait tout du travail de Heisenberg. Il prit connaissance de la thèse soutenue en 1924 par le français Louis de Broglie, où l'on associait une onde à l'électron et où les états stationnaires de cette onde permettaient de comprendre la quantification des mouvements dans l'atome. Paul Langevin avait envoyé la thèse à Einstein, qui fut enthousiasmé et lui répondit en disant que de Broglie avait levé un coin du voile. Et Einstein de recommander la thèse de de Broglie, ce qui permit à Schrodinger d'en prendre connaissance. C'est en cherchant à trouver une équation pour l'onde de de Broglie* qu'il formula l'équation de Schrodinger* pour l'atome d'hydrogène. En résolvant (avec l'aide d'Hermann Weyl*) cette équation pour les ondes stationnaires, il obtint le spectre d'absorption électronique de l'atome, tout comme Pauli en mécanique des matrices.

La naissance de la mécanique quantique fut accompagnée de développements importants des mathématiques. En 1928 Hermann Weyl publia un livre clé sur la mécanique quantique et la théorie des groupes*. David Hilbert à Göttingen s'intéressa de très près à la mécanique des matrices de son ami Max Born. La formulation de la mécanique quantique s'accompagna de développements significatifs de l'analyse fonctionnelle*.

MECANIQUE QUANTIQUE (PHILOSOPHIE DE LA) (Cf. aussi Interprétations et philosophie de la mécanique quantique*).

La philosophie de la mécanique quantique cherche à préciser le type de démarche philosophique à l'œuvre dans la mécanique quantique. Ne pouvant apporter la preuve de la nature des substances mises en jeu dans la microphysique, que ce soit la nature exacte des particules élémentaires* ou la nature réelle de l'onde de de Broglie*, la mécanique quantique n'est pas une description réaliste* et substantialiste* de la réalité, mais un système de manipulations symboliques qui tire sa cohérence du plein emploi d'une structure mathématique*, la structure d'espace vectoriel* d'un espace de Hilbert*. On peut de ce fait soupçonner la mécanique quantique de tirer sa vérité* d'un réalisme structural* exemplaire. Le discours de la mécanique quantique est une spéculation probabiliste entièrement fondée sur l'emploi de la notion abstraite d'état* et sur l'utilisation des objets mathématiques que sont les opérateurs*, qui ne décrivent en rien les instruments de mesure*, pour obtenir des prédictions sur les résultats macroscopiques des mesures* possibles.

N'ayant pas accès à la réalité microphysique elle-même mais seulement à son image dans le monde macroscopique à travers l'opération de mesure, la mécanique quantique laisse planer un doute sur l'origine véritable du hasard dans son discours probabiliste.

La mécanique quantique est profondément en résonance avec les positions du kantisme* sur la distinction entre noumène* et phénomène*. Selon Kant, l'état n'existe pas comme quelque chose en dehors de nous, mais comme une représentation à l'intérieur de nous même.

MECANIQUE QUANTIQUE RELATIVISTE

MECANIQUE QUANTIQUE

(STATUT IDEOLOGIQUE , CULTUREL ET SOCIAL)

Durant les XVIII^e et XIX^e siècles le mécanisme* a régné en maître dans la science et la culture scientifique. Newton* a été le fondateur d'une philosophie et d'une idéologie* qui a pénétré toutes les couches de la société cultivée, et dont Voltaire* est un exemple représentatif. Cette idéologie, fondée sur une représentation réaliste* des phénomènes et une explication du mouvement* par des forces* a présidé à tout le développement scientifique et technologique de ces siècles. Une question comme celle de l'éther* a constitué pendant longtemps un des bastions du mécanisme, et l'échec de l'éther

mécaniste a été considéré comme un problème douloureux au cœur du mécanisme. Mais la théorie de la relativité restreinte* en éliminant l'existence d'un éther mécaniste ne fait que prolonger le point de vue mécaniste et ne participe en rien à la mort du mécanisme universel. Celle-ci ne survient que par l'apparition de la théorie quantique initiée par Planck* et Einstein* et accomplie dans la mécanique quantique issue des travaux de Louis de Broglie*, de Schrödinger* et de Heisenberg* dans les années 1924-1926. Un dessinateur humoriste russe des années 20 a très justement intitulé un de ses dessins : « Planck a tué l'éther » ce qui signifierait plutôt « Planck a tué le mécanisme ». Effectivement les quantas* et la mécanique quantique* ont constitué un choc culturel sans précédent depuis Newton.

Choc culturel si important que la mécanique quantique a mis longtemps à pénétrer les milieux savants et cultivés. En 1933, Maurice Maeterlinck, prix Nobel de littérature, habitué à écrire des ouvrages de vulgarisation scientifique, écrit un livre sur la gravitation et l'éther, où la mécanique quantique n'apparaît pas. Il n'a d'ailleurs rien écrit sur la mécanique quantique. En 1936 on inaugure à Paris le Palais de la Découverte où la mécanique quantique est absente et où trône le modèle mécaniste de l'atome de Bohr*. La situation n'avait pas véritablement changée dans les années 80 et un directeur de l'établissement, pourtant physicien et connaisseur du sujet, déclarait alors, qu'il n'avait nullement l'intention de modifier cette situation. Il considérait que la mécanique quantique était trop abstraite pour être présentée aux visiteurs de l'établissement. Remarquons que jusqu'à la fin des années 50 la mécanique quantique était absente du cursus de physique générale à la Sorbonne et qu'elle était uniquement exploitée via l'équation de Schrödinger dans des enseignements parallèles comme celui de chimie-physique. Seul Louis de Broglie enseignait la mécanique quantique générale dans son cours de haute spécialité, et la mécanique quantique faisait l'objet de nombreux exposés au « séminaire Proca* ». Il n'y avait pas de manuels disponibles et toute une génération de l'après guerre a appris cette théorie dans le livre de Seitz, un élève de Wigner*, pionnier de la physique du solide, « *The modern theory of solids* »(1940). Les deux grands livres de base : « *The principles of quantum mechanics* » de Dirac*(1930) et « *The mathematical foundation of quantum mechanics* » de Von Neuman*(1932) critiquant durement l'emploi de la « fonction » δ par Dirac, restaient peu connus malgré leur traduction en français par Alexandre Proca*. Les soviétiques ont eu la chance d'avoir très tôt après la

guerre à leur disposition le magnifique ouvrage didactique de Blokhintsev*.

La mécanique quantique de par son caractère abstrait a toujours laissée dans l'esprit des gens flotter une ambiguïté sur l'objet du discours : une réalité physique intrinsèque ou une mise en ordre des observations possibles. Cette dernière interprétation avait pourtant judicieusement été soulignée par Jean Piaget* dans son « *Introduction à l'épistémologie génétique* », où il la rattache à sa doctrine du constructivisme*. Mais les physiciens à tort ne lisent pas cet ouvrage.

Une autre source de difficultés provenait du manque de compréhension du sens de la superposition des états* qui n'exprime pas une quelconque coexistence d'états en résonance. Une telle interprétation véhiculée par les chimistes à propos de la théorie de la mésomérie* ou théorie de la résonance, a été très justement sévèrement critiquée par les savants marxistes soviétiques. Cette critique discréditant la théorie de la mésomérie comme une théorie idéaliste occidentale a contribué à stériliser la chimie théorique* en URSS, pourtant en essor avec le livre de Syrkin et Diatkina. Il était pourtant évident pour tous les quanticiens que les trois formules mésomères* de Kékulé* pour le benzène* n'impliquaient pas que « l'électron saute d'une formule à l'autre à la vitesse de la lumière » mais représentaient trois états possibles à additionner selon le précepte de linéarité de la mécanique quantique. Cette notion d'état quantique* reste encore aujourd'hui largement incomprise dans la littérature générale où l'on trouve souvent écrit que l'observation* modifie le système physique alors qu'elle modifie, l'état, c.a.d. l'information de l'observateur sur le système.

Après avoir tenu le haut du pavé culturel et avoir largement contribué à l'avènement des nouvelles technologies de l'information, la mécanique quantique se voit disputer la vedette par la théorie des systèmes dynamiques* à l'origine d'un néomécanisme*. Mais entre temps la mécanique quantique a changé de visage et se présente maintenant comme une théorie de l'information quantique*, ce qui permet à la Physical Review de changer l'ordre de ses rubriques et de placer en tête au lieu de physique générale, quantum information. L'information* s'impose avec insistance dans la théorie quantique et dans le néomécanisme, au point de créer une idéologie scientifique dominante que la cybernétique* avait ébauchée.

MECANIQUE RELATIVISTE

MECANIQUE STATISTIQUE CLASSIQUE

La mécanique statistique classique est une branche de la physique théorique qui cherche à rendre compte du comportement thermique des corps macroscopiques en termes d'un modèle mécanique classique pour leurs constituants microscopiques, avec l'aide d'hypothèses probabilistes. Depuis 150 ans de nombreux modèles ont été proposés différant par les hypothèses fondamentales et par la signification de l'usage des probabilités. Le problème le plus délicat se trouve dans l'explication de l'asymétrie temporelle dans le comportement thermique (irréversibilité*).

A la différence de la théorie quantique ou de la relativité, la mécanique statistique ne présente pas un corps unique d'hypothèses fondatrices même si tout le monde s'accorde pour voir en Maxwell*, Boltzmann* et Gibbs* les pères de la discipline.

Le problème essentiel du fondement de la mécanique statistique est dans la manière dont sont introduites les probabilités, soit qu'elles apparaissent de manière naturelle dans la description mécanique (théorie cinétique*, théorie ergodique*) soit qu'elles sont introduites à partir d'hypothèses ad hoc.

La difficulté majeure de la mécanique statistique réside dans le traitement simultané d'un nombre infini de particules, ce qui exclu un traitement déductif exact et nécessite le recours à des principes ou des hypothèses appropriées. C'est ainsi que l'on peut obtenir les distributions de probabilité à l'équilibre (distributions de Gibbs) en leur imposant de maximiser l'entropie* informationnelle. Ceci revient selon Jaynes* à considérer les concepts informationnels comme premiers et à les utiliser en mécanique statistique. La mécanique statistique est alors considérée comme une forme d'inférence statistique* plutôt qu'une description d'une réalité physique objective, et les probabilités sont interprétées d'une manière épistémique comme mesure de vérité de propositions logiques plutôt que comme quantités physiques en principe mesurables. Il ne faut cependant pas considérer une telle méthode heuristique de déduction des distributions statistiques comme un fondement rigoureux de la mécanique statistique.

Conceptuellement il aurait été satisfaisant de déduire la mécanique statistique dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques* (théorie ergodique*), mais le grand nombre de particules s'est jusqu'à présent opposé à ce que l'on obtienne des résultats exacts dans ce domaine.

MECANIQUE STATISTIQUE (PHILOSOPHIE DE LA)

MECANIQUE STATISTIQUE QUANTIQUE

MECANISME

Combinaison de pièces, d'organes agencés en vue d'un mouvement, d'un fonctionnement d'ensemble; ce fonctionnement lui-même. Ensemble d'éléments, de structures dont l'organisation assure une fonction, une activité; ce fonctionnement, ce processus lui-même.

Le mécanisme est un terme d'emploi très vaste pour désigner un ensemble de causes* d'un phénomène. Le mécanisme d'une machine, le mécanisme de l'émission de lumière par un laser*, le mécanisme de l'hérédité, les mécanismes de la pensée, les mécanismes du langage.

La recherche d'un mécanisme contient souvent une référence implicite au mécanicisme*. On aimerait trouver des mécanismes pour expliquer le comportement des systèmes complexes* ou les comportements complexes des systèmes dynamiques* simples ; la notion de mécanisme y est souvent délicate à définir.

MEDIATION

La médiation est une fonction d'animation d'une dynamique de réalisation d'un monisme à partir d'un pluralisme. Elle peut aussi n'être qu'une zone de transition entre des éléments opposés. Elle suppose de toute façon une participation médiatrice aux diverses instances contraires.

Dans le second sens, le psychanalyste D.W. Winnicott définit un objet transitionnel comme une médiation entre le moi et le non moi, comme un champ intermédiaire d'expérience entre la réalité intérieure et la réalité extérieure.

Le concept de champ en physique se présente comme un concept médiateur assurant la transmission de proche en proche des actions à distance et permettent les interactions.

Par contre, l'âme du monde* chez Platon est un intermédiaire dynamique entre le sensible et l'intelligible, les choses et les idées. elle contemple l'intelligible, mais se trouve en contact avec le sensible dont elle arrive à assurer la conformité avec son modèle intelligible.

Le mercure des alchimistes, dissolvant de tous les métaux est un médiateur universel de la métallurgie liquide, tout comme la

quintessence* est un médiateur universel entre les oppositions des éléments et des qualités aristotéliennes.

Le vide quantique remplit bien souvent les mêmes fonctions que la quintessence médiévale. Il est en tout cas un médiateur mathématique universel entre les ondes et les corpuscules dans le "monisme* onde-corpuscule".

MEDIUM

MELANGE

Opération consistant à forcer deux entités spatialement distinctes à occuper le même espace (physique ou conceptuel), dans des proportions localement bien définies. C'est une juxtaposition homogène. La forme initiale des entités peut se modifier au point de les rendre non reconnaissables, mais leur identité est inchangée. Dans du café au lait (ou un lait au café- le renversé suisse) le lait et le café ne sont pas reconnaissables mais ils sont partout présents avec leurs qualités propres. Dans un mélange, la distinction de nature est préservée.

Un mélange est une intersection* au sens logique, et non pas une addition* au sens arithmétique, qui est le propre d'une superposition*.

La théorie de la couleur distingue clairement le mélange des pigments (qui produit une couleur par synthèse soustractive) de l'addition des lumières colorées (qui produit une couleur par synthèse additive).

La mécanique quantique distingue de même des états de mélange, réunion d'états, d'états de superposition*, addition arithmétique d'états.

MELANGE (mixing) (Cf. Théorie qualitative des systèmes dynamiques*)

MEMOIRE

Prise en compte dans le temps présent des événements du passé.

Les systèmes vivants présentent cette propriété particulière. Décrire un système vivant au présent seulement n'a aucun sens. Il faut tenir compte de l'évolution*. Certains êtres vivants ont même un organe qui peut emmagasiner des souvenirs, le cerveau* avec son hippocampe.

Les mathématiciens et les physiciens cherchent à donner une représentation de la nature, où seul le présent est garant de l'avenir. Ils construisent des théories où l'on peut définir la notion d'état* présent. La théorie des systèmes dynamiques* avec ses équations différentielles*, les processus markoviens* et la mécanique quantique*.

Restent les systèmes qui ne s'accommodent pas de cette image, les systèmes héréditaires* et les phénomènes d'hystérisis*.

MEREOLOGIE

MESOMERIE

MESONS

Classe de particules élémentaires* instables du type hadrons*, à spin nul ou entier (bosons) et constituées d'un quark et d'un antiquark.

MESSAGE

Ensemble de signes* transmis par un canal* dans une communication*. C'est une portion de référent* transformée par un code* et dans lequel se noue l'interaction des partenaires de la communication*, ce qui la rend transmissible par un canal*.

MESURE

MESURE EN MATHEMATIQUES

La théorie de la mesure en mathématiques définit la mesure comme un nombre associé à un ensemble de points (couramment dit une surface). Elle nécessite des développements particuliers si l'on veut envisager des ensembles infiniment petits pour fonder la théorie de l'intégrale*.

Du point de vue mathématique la théorie de probabilités* c'est la théorie mathématique de la mesure avec en plus la notion d'indépendance*.

MESURE EN MECANIQUE QUANTIQUE

La mesure en mécanique quantique est un processus abstrait qui fournit les valeurs observables expérimentalement avec un type donné d'expérience sur un système dans une préparation* donnée. Elle associe donc des valeurs expérimentales d'observables macroscopiques à un état*. C'est nécessairement un concept formel où n'intervient pas une description de l'appareil de mesure, car celui-ci participe de la boîte noire pour sa partie au contact du système microphysique. La mesure ne fournit pas des valeurs préexistantes d'une grandeur physique, mais crée véritablement ces valeurs observables comme grandeurs classiques. La mesure ne révèle pas la position d'une particule mais la positionne. Elle extrait de l'univers quantique une information concrétisée par une observable classique. Une mesure porte au niveau du monde macroscopique, lisible par un observateur, une information relative à un système quantique. Elle se situe à la frontière mal définie entre le classique* et le quantique.

La mesure est vraisemblablement à l'origine de l'apparition du hasard en mécanique quantique. Rien ne permet de dire que c'est le monde microscopique qui est fluctuant. Ce sont les observables macroscopiques créées par la mesure qui fluctuent. C'est le contact du microscopique avec le macroscopique qui s'avère instable.

La mesure en tant que sortie de la boîte noire entraîne de par sa réalisation même un changement d'information sur la boîte noire, c.à.d. en général un changement de l'état*. La préparation définit l'état*, la mesure le modifie en général.

Mais alors qu'en l'absence de mesure l'état évolue selon l'équation de Schrödinger, lors de la mesure l'état subit un changement brusque imprévisible, car le résultat de la mesure n'a qu'une certaine probabilité. Il y'a donc là un postulat supplémentaire sur l'évolution de l'état, qui suppose en particulier qu'après la mesure, l'état est un état où la valeur de l'observable est connue d'avance, comme le résultat obtenu dans la mesure. C'est le postulat de projection de Von Neumann* ou postulat de réduction* du paquet d'onde.

Ce postulat n'est cependant pas vérifié par de nombreuses procédures expérimentales concrètes de mesure. Ainsi par exemple un compteur idéal de photons les détecte en les absorbant donc en les annihilant. L'état final du champ électromagnétique après la mesure est l'état vide et non pas le vecteur propre de l'observable nombre de photons correspondant au nombre de photons détectés.

Ce double régime d'évolution de l'état pose encore à l'heure actuelle de sérieuses difficultés conceptuelles et logiques. Ceci fait apparaître clairement à nouveau le problème non résolu du rapport entre la mesure, concept abstrait, et un éventuel appareil concret de mesure.

Il est plus rigoureux de parler de mesure que d'observation* pour souligner le caractère abstrait de cette notion et le fait que l'on n'observe pas une observable mais on la mesure. On n'observe pas la position d'une particule, on la positionne. C'est là un aspect de la mécanique quantique qui satisfait peu beaucoup de physiciens, qui voient là un concept arbitraire non fondé par une théorie et correspondant mal à des conditions expérimentales précises. Bien des procédures appelées mesure restent encore des expériences de pensée*. Comme tout l'édifice de la mécanique quantique repose sur cette notion de mesure, il subsiste vis-à-vis de cette théorie un malaise certain, même si rien n'est jamais venu la contredire.

Dans un article cinglant, en 1990, « Against measurements », le grand John Bell* a fustigé une théorie physique comme la M.Q. fondée sur des mots mal définis. Il place dans cet enfer : *système**, *appareil*, *environnement**, *microscopique**, *macroscopique**, *reversible**, *irréversible**, *observable**, *information**, *mesure**. On pourrait ajouter *connaissance**. La M.Q. est laminée conceptuellement même si elle reste utile pour toutes fins pratiques. La théorie semble exclusivement concerner les résultats de mesures et rien d'autre.. C'est en en connaissant les faiblesses que nous adoptons dans ce lexique une interprétation empiriste de la M.Q., qui est une approche cybernétique* où l'objet s'efface au profit d'une boîte noire.

MESURE QUANTIQUE NON DESTRUCTIVE

les mesures QND du champ électromagnétique. Le but en est de mesurer une observable du champ sans la perturber de façon à pouvoir répéter la mesure et retrouver le même résultat dans une mesure ultérieure. Il s'agit de la mesure projective d'une observable qui ne change pas entre deux détections successives sous l'effet de l'évolution Hamiltonienne. L'énergie du champ et son nombre de photons sont des observables pouvant être mesurées de façon QND, à condition d'éviter l'absorption de photons dans le détecteur. Nous avons présenté quelques modèles

simples de mesures QND, basées soit sur la détection de la pression de radiation exercée sur un miroir (mesures opto-mécaniques), soit sur l'effet Kerr croisé dans un milieu optique non linéaire.

Mesure quantique non destructive

Le postulat de projection a une conséquence importante. La relation d'incertitude de

Heisenberg pose une limite à la précision de notre connaissance de deux observables A^{\wedge}

et

B^{\wedge} ne commutant pas :

$$\langle A \rangle \langle B \rangle - \langle AB \rangle = \frac{\hbar}{2i} \langle [A, B] \rangle$$

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{\hbar}{2}$$

où ΔA :

Puisqu'une mesure quantique de l'observable A^{\wedge}

réduit le bruit de celle-ci, le bruit de

l'observable B^{\wedge}

est donc augmenté. Cet effet, appelé « action en retour », a été identifié théoriquement très rapidement après l'énoncé des postulats [3]. Or, pour certains couples

de variables, les fluctuations induites sur B^{\wedge}

influent sur l'évolution ultérieure de l'observable mesurée A^{\wedge}

. Par exemple, une mesure parfaite de la position X^{\wedge}

résulte en une

indétermination complète de l'impulsion P^{\wedge}

. En conséquence, très peu de temps après la

mesure, la valeur de la position est à nouveau indéterminée. Dans ce type de cas, une

répétition de la mesure ne donne pas nécessairement le même résultat.

Dans les années

70 a été introduit le concept de mesure quantique non destructive (QND) [4, 5, 6], posant

des conditions pour qu'une mesure puisse satisfaire le critère de répétabilité quel que soit

l'intervalle de temps entre deux mesures.

De nombreuses observables, telles que X^{\wedge}

, ne peuvent intrinsèquement remplir ce critère.

Pour qu'une observable soit QND, l'action en retour doit affecter une variable n'influant

pas sur l'évolution ultérieure de l'observable. Une observable QND doit donc être stable

1 Dans le cas d'une valeur propre non dégénérée.
 tel-00284379, version 1 - 3 Jun 2008 INTRODUCTION 3
 lors de l'évolution libre du système, noté S . Une ob
 lors de l'évolution libre du système, noté S . Une observable A^\wedge
 S est donc QND si

$$[H^\wedge$$

$$S; A^\wedge$$

$$S] = 0 ;$$

où H^\wedge

S est le hamiltonien du système.

Une mesure porte au niveau du monde macroscopique, lisible par un observateur, une information relative à un système quantique. Une mesure se fait donc par l'intermédiaire d'un appareil que nous appellerons mètre, noté M , qui se couple au système à mesurer.

L'état du mètre « pointe » vers l'un des états propres d'une observable que nous noterons

$$A^\wedge$$

M . Une condition pour que ce mètre effectue une mesure de l'observable A^\wedge

S est que son état après interaction contienne une information sur l'état du système à mesurer, ce que

l'on peut écrire comme :

$$[H^\wedge$$

$$\text{int}$$

$$; A^\wedge$$

$$M] = 0 \quad 6 ;$$

où H^\wedge

int est le hamiltonien d'interaction entre le système et le mètre.

Enfin, pour que la mesure soit non destructive, l'interaction ne doit pas modifier les

états propres de l'observable à mesurer A^\wedge

S , ce qui est garanti par la condition

$$[H^\wedge$$

$$\text{int}$$

$$; A^\wedge$$

$$S] = 0 :$$

En pratique, il n'est pas aisé de satisfaire ces critères. Les mesures usuelles ne sont pas

QND. Prenons l'exemple de l'observable QND nombre de photons $N^{\wedge} = a^{\wedge} a$
 +
 a^{\wedge} d'un champ électromagnétique de fréquence ω . Cette observable est bien conservée par l'évolution libre, définie par le hamiltonien $H^{\wedge} = \hbar\omega(N^{\wedge} + 1/2)$. Deux exemples de photodétecteurs extrêmement répandus sont l'oeil, et les photodiodes. Dans ces deux cas, le nombre de photons est mesuré par absorption, ce qui détruit complètement l'objet mesuré. Pour une mesure QND, il est en fait plus aisé de concevoir un protocole de mesure indirecte, pour lequel le système S se couple tout d'abord à un système mètre M quantique

METABOLISME

METALANGAGE

METAMATHEMATIQUE

Mathématique des mathématiques. C'est une métathéorie*.

Partie de la logique mathématique* qui étudie les théories mathématiques formalisées. L'apparition de la métamathématique est liée au programme défini par Hilbert du fondement des mathématiques*.

METAPHORE.

Emploi d'un mot dans un sens ressemblant à, et cependant différent de son sens habituel. La métaphore ne change pas le signe (en fait le signifiant*) mais change la signification (le signifié*), alors que le symbole* est au contraire un changement de signe (de signifiant*) sans changement de signification. Au sens large tout emploi d'un mot (signifiant*) dans un sens non littéral*, un sens figuré*. Tout écart qui traduit un sens littéral en un ou plusieurs sens figurés. Un même mot désigne donc là des réalités différentes, posant le problème du Même et de l'Autre, de la Ressemblance et de l'Identité. La métaphore exprime toujours une similarité d'aspect ou de fonction. La métaphore

communique implicitement ce que la comparaison* dit explicitement. Longtemps considérée comme une expression linguistique déviante, simple enjolivure du discours, elle est de plus en plus envisagée comme une forme essentielle de la connaissance*, de la compréhension et du raisonnement.

La métaphore continuée ou métaphore filée est le cas où le signifiant ne se réduit pas à un mot mais à une phrase qui développe le mot. La métaphore filée est voisine de l'allégorie*. La métaphore filée est à l'œuvre dans la phrase tout entière et non à l'échelle des rapports entre mots. Elle appréhende une totalité de sens.

Le statut de la métaphore dans la pensée scientifique soulève à nouveau le problème du réalisme scientifique*. Il y a trois principaux emplois de la métaphore :

La métaphore n'a rien à voir avec le monde objectif

La métaphore est une substitution ou une comparaison liées à une analogie ou à une similarité. Par brévité on omet les termes comme ou similaire

La métaphore crée une similarité, comme c'est le cas pour un modèle*.

Pour Bohr l'atome se comporte comme s'il était un minuscule système solaire. Pour Piaget* la métaphore crée une assimilation ou une accommodation. Les métaphores peuvent être utiles pour l'accommodation du langage à des causalités du monde non encore découvertes.

Toute la physique mathématisée n'est qu'un travestissement métaphorique de la réalité, puisqu'elle emploie le même terme pour désigner un objet de la nature et un objet abstrait qu'elle manipule.

Certains concepts métaphoriques peuvent accéder à la réalité. Certains défendent l'autonomie des diagrammes de Feynman*, ou l'existence des particules virtuelles*.

METAPHORE ET PHYSIQUE

La physique a toujours été une grande consommatrice de métaphores, ne fut ce que par son utilisation systématique de l'analogie dans l'activité de modélisation, en particulier dans la culture cybernétique contemporaine.

La métaphore est le carrefour d'un transfert d'idées véhiculées par les mots et rendant le langage opératoire. Comme telle elle est essentielle dans tous les processus de formation de modèles qui font avancer la connaissance (scientifique). Lorsque Maxwell* considère un champ électrique comme un fluide ou un atome comme une boule de

billard, lorsque Bohr* considère l'atome comme un petit système solaire, ils ne se bornent pas à utiliser des images pour mieux représenter. Ils transfèrent d'un domaine à un autre tout un ensemble de concepts qui vont enrichir la connaissance.

Des métaphores prenant appui sur Dieu et la Nature sont historiquement liées à la formulation de certains des principes les plus généraux de la physique moderne. La sagesse de Dieu, la simplicité de la nature, sont des sources de métaphores à l'origine de l'expression des principes de conservation chez Leibniz* ou du principe de moindre action chez Maupertuis. Simplicité et conservation (symétrie et conservation) , principes variationnels sont l'âme fertile de la physique.

Au XI ème siècle le grand philosophe juif Maïmonide* remarquait déjà que l'homme ne se figure l'existence qu'à travers la conscience du corps et qu'il applique cela tout naturellement à Dieu. Il le regrettait évidemment. Nous devons constater le rôle scientifique considérable joué par les métaphores du corps en particulier dans les problématiques de l'espace, du vide et de l'éther. Mais la notion de corps ne va pas de soi, pas plus que celle d'espace ou de vide. Ce que nous pouvons dire du corps peut en général se dire du vide. Le corps se présente tantôt comme une réalité objective, une chose, une substance, tantôt comme un signe, une représentation, une image. La psychanalyse freudienne va jusqu'à considérer le corps comme une fiction, à l'entrecroisement du fantasme, de l'inconscient et de l'imaginaire. Le corps devient alors une véritable construction à l'intérieur d'un système signifiant abstrait. N'en est-il pas de même du Vide dans le physique contemporaine, où la mécanique quantique raconte une fiction dans un espace mathématique abstrait (l'espace de Hilbert). Entre le Sensorium de Dieu chez Newton* et le Vide Quantique, n'est ce pas le même fantasme qui est à l'œuvre.

METAPHORE ET BIOLOGIE

METAPHYSIQUE

Discours sur les principes et les fondements de l'être* qui n'appartiennent pas au domaine sensible ainsi que sur les êtres et les objets inaccessibles aux sens C'est la connaissance fondamentale de l'étant* comme tel et en totalité. Il s'agit donc de la connaissance des choses en elles mêmes par delà leurs apparences (ontologie*) ou de ce qui échappe à toute observation, étant surnaturel, immatériel, sans

apparences ou qualités sensibles. Dieu, l'âme, le vide* en un certain sens, relèvent de la métaphysique.

On peut aussi défendre l'idée que la métaphysique étudie le monde, non comme il est dans la réalité, mais comme il est dans notre esprit ou comme il pourrait être.

On la définit aussi comme la science des premiers principes, la philosophie première, la science des causes premières, la science des êtres spirituels, des choses abstraites et purement intellectuelles.

Le nom vient de celui donné à un ouvrage d'Aristote* où il traite de questions très générales, des premiers principes et de ce qui est au dessus des sens.

Sous l'influence de la science moderne en gestation la métaphysique a connu un déclin face aux divers matérialismes* et au physicalisme* en expansion. L'empirisme logique* ne cherchait pas moins que d'éliminer la métaphysique par une analyse critique du langage.

Mais la science contemporaine fait face à un problème métaphysique majeur, celui de l'existence de non-observables*, entités invisibles postulées par de nombreuses théories scientifiques (ex. le photon*, l'espace-temps*, l'onde de de Broglie*, les particules virtuelles*, le vide quantique*, les univers parallèles dans l'interprétation de la mécanique quantique*, les trous noirs*, la matière noire* de l'univers.....). Entre la métaphysique et la physique il y'a aujourd'hui une complicité étonnante, due à ce que de nombreux concepts de la physique sont retravaillés à partir de concepts de la métaphysique. Ainsi de la notion de hasard qui passe au siècle dernier de la métaphysique à la science. Ce qui fait dire à certains que la physique est une métaphysique, une métaphysique de la nature* !

L'histoire de la métaphysique dans les temps modernes en occident est marquée par des périodes d'éclat et de déclin.

Descartes*, Spinoza* et Leibnitz* sont des rationalistes* qui croient en la toute puissance de la Raison* et donc à son aptitude à accéder au réel*. Réalistes* et par là même métaphysiciens.

Les empiristes, de Hobbes* à Hume*, à travers Locke* et Berkeley* préparent la venue de Kant* qui met à mort la métaphysique en ouvrant l'ère du positivisme*.

En fait l'idéalisme allemand* est la continuation de cette vision de l'homme, spécifique au monde germanique, qui se caractérise par la distance à Dieu*, qu'aucun salut venant d'ici bas ou de la raison* ne peut venir combler. La pensée allemande exprimera ainsi le sentiment de finitude de la raison, de la conscience malheureuse et de l'existence

déchirée par l'histoire ou la vie, que l'on retrouvera tout au long du XIX^e et du XX^e siècles.

Heiddegger*, élève de Husserl* est comme un coup de tonnerre dans cet univers imbibé d'instrumentalisme*, de conventionalisme* et de positivisme*. Il réexamine toute « l'ontologie de la substance* » dite aussi « Métaphysique de la présence ». Doctrine qui se manifestait déjà chez :

Platon* avec la notion de formes*

Aristote* avec les substances primaires

Dans la doctrine chrétienne du Créateur

Descartes* avec la res extensa* et la res cogitans

Kant* avec le noumène*

Dans le naturalisme* scientifique et le matérialisme* physique.

METATHEORIE

Théorie analysant les structures* les méthodes et les propriétés d'une autre théorie. Parmi les métathéories les plus développées se trouvent la métathéorie de la logique mathématique* et la métathéorie des mathématiques (métamathématique*). L'objet des considérations d'une métathéorie n'est pas tant le contenu d'une théorie que son formalisme*, ce qui exige l'examen du système formel* de la théorie apparaissant dans son axiomatisation*. Analyse syntaxique* et analyse sémantique* (interprétation*) sont au menu de toute métathéorie.

La notion de métathéorie a été introduite par Hilbert* dans son programme de fondement des mathématiques* (métamathématique*). Une série de résultats importants d'ordre sémantiques ont été obtenus par le logicien polonais Alfred Tarski*, qui a développé une théorie de la vérité*.

METONYMIE.

Emploi d'un mot pour désigner un objet ou une propriété qui ont un rapport de coexistence avec la référence habituelle de ce même mot. Une chose reçoit le nom d'une autre avec laquelle elle a un rapport direct, un contact, une contiguïté physique ou logique.

Dire « Une Jaguar » pour désigner une voiture!

MICROCOSME ET MACROCOSME

La doctrine du parallélisme entre le microcosme et le macrocosme est une des conceptions les plus anciennes de la philosophie naturelle. Elle s'exprime déjà dans les mythes

cosmogoniques de « l'homme cosmique originel » dont le corps engendra la terre, les os engendrèrent les pierres, le sang les rivières, les cheveux les arbres, la respiration le vent.....

Très répandues dans l'Antiquité (Héraclite, Démocrite, Anaxagore, Platon, les Stoïciens) et au Moyen Age (Hildegarde de Bingen, la mystique rhénane –Maître Eckhart -, les philosophes juifs comme Ibn Gabirol ou la Kabbale*), les théories de la correspondance du macrocosme et du microcosme culminent à l'époque de la Renaissance.

Elles servent de fondement à une nouvelle anthropologie chez Pic de la Mirandole*, prennent la forme d'un panpsychisme hylozoïque dans la philosophie naturelle de Giordano Bruno*, de Cardan, de Campanella.

Elles imprègnent la mystique allemande à travers Nicolas de Cues, V. Weigel (en particulier dans le traité « Erkenne dich selbst, dass der Mensch sei ein Mikrokosmos. 1615) et Jakob Böhme (Mysterium Magnum). Elles sont présentes dans l'occultisme médico-magico-alchimique d'Agrippa et de Paracelse ainsi que chez leur collègue anglais R. Fludd où elles entrent en conflit ouvert avec les conceptions des créateurs de la nouvelle image du monde (Kepler*, Gassendi*).

Dans le rapport microcosme-macrocosme se joue le rapport de l'Homme à Dieu, de l'Univers à Dieu, de l'Immanence à la Transcendance. Avec pour l'homme l'enjeu essentiel de la connaissance. Le privilège de l'homme est de pouvoir par sa pensée accéder à l'Autre et à l'Ailleurs. La négation et l'opposition participent de ce privilège. Le « Solve et Coagula » alchimique* l'exemplifie à merveille. On peut aussi dire que l'un des privilèges anthropologiques de la pensée est de pouvoir changer d'échelle.

Du fini à l'infini, de l'Homme à Dieu, on change d'échelle, ce qui s'accompagne de modifications que l'on peut chercher à qualifier selon deux axes opposés : simplification-complexification.

La relation microcosme-macrocosme est aujourd'hui remise en vedette dans la cosmologie quantique*.

MICROPHYSIQUE

MICROSCOPIE

MICROSCOPIE A CHAMP PROCHE

MICROSCOPIE A EFFET TUNNEL

MICROSCOPIE CONFOCALE**MICROSCOPIE ELECTRONIQUE****MILIEU****MILIEU ACTIF****MIMESIS**

Le mot grec mimésis (en latin imitatio) désigne dans l'histoire des idées l'ensemble des conceptions liant l'activité intellectuelle, artistique ou scientifique, à l'imitation de la réalité extérieure. Avec toutes les variantes liées aux différentes définitions possibles de la notion d'imitation. Toute mimésis présuppose un modèle*, et la modélisation* est une forme de mimesis.

Le plus souvent la mimésis est considérée comme la copie de l'apparence des choses, l'imitation de la forme. C'est le sens courant dans le domaine artistique.

Mais la science et la technique considèrent bien souvent la mimésis au sens de Démocrite, comme une imitation de la manière dont fonctionne la nature, l'imitation du comportement. On désigne cette démarche comme une simulation* ou un simulacre*.

La mimésis est l'art du faire-croire, la réalisation du Comme si*.

MIMETISME**MODALITE**

Manière dont une chose, un fait, une proposition, existe selon qu'ils sont nécessaires, réels*, possibles*, aléatoires*,

MODE (d'un champ)**MODELE**

Le modèle est une représentation* de la connaissance* que l'on possède sur un objet ou un phénomène. C'est un intermédiaire entre moi et le monde, au même titre que les déterminations que l'esprit impose aux choses. C'est une construction aux prises avec les deux attitudes fondamentales de l'épistémologie : le réalisme* et

l'instrumentalisme*. Pour les besoins de la représentation le modèle épouse les avatars de la mimésis*. Ce faisant l'histoire de la notion de modèle est ancienne et multiforme.

On peut distinguer cinq champs de signification du mot modèle selon les vicissitudes historiques et les racines étymologiques grecques et latines. La signification commune est celle de comparaison, de similitude et de représentation.

- **En grec *metron* et en latin *modus, modulus* signifient mesure. On désigne par là à la fois les unités de mesure, les instruments de mesure et les éléments de référence architecturaux.**
- **En grec *typos* et en latin *forma* désignent la forme, la figure, le moule.**
- **Le grec *paradeigma* et le latin *exemplar*, désignent des représentations à échelle réduite de bâtiments de bateaux ou de machines. Mais le mot peut aussi avoir un sens abstrait. Ainsi Aristote qualifie l'idée platonicienne de *paradeigma*. Elle est effectivement un modèle abstrait (original) d'une chose réelle.**
- **En grec *idea, eidos, eidolon, eikon* et en latin *imago* et *simulacrum* couvrent un vaste champ sémantique correspondant essentiellement au mot image et en anglais *picture, shape, form, pattern*.**
- **Représentation plastique, en cire par exemple.**

La polysémie de la notion de modèle apparaît dans la variété des adjectifs accolés au mot modèle : modèle phénoménologique, modèle matériel, modèle computationnel, modèle de développement, modèle explicatif, modèle d'essai, modèle idéalisé, modèle théorique, modèle réduit, modèle heuristique, modèle caricatural, modèle didactique, modèle jouet, modèle imaginaire, modèle mathématique, modèle de substitution, modèle iconique, modèle formel, modèle analogique, modèle cybernétique et bien d'autres.

Dans la pratique l'usage du modèle se signale par des termes du langage ou par des figures de langage (tropes*). Le modèle peut être « comme la réalité » ou bien encore « comme s'il était la réalité ». Le modèle comporte souvent dans sa constitution une analogie* ou une métaphore*. Le modèle peut accomplir une simulation* ou un simulacre*.

Un modèle peut être physiquement réalisé ou réalisable (modèle matériel) ou garder un caractère abstrait, mathématique par exemple (modèle formel). Un modèle formel est une structure syntactique*,

alors qu'un modèle matériel a un caractère sémantique*, car il fait référence à des entités réelles ou imaginaires.

Le rapport entre modèle et théorie* est difficile à préciser. Le plus souvent le modèle est considéré comme une simplification de la théorie qui permet de comprendre celle-ci. Une pré-théorie même. Mais bien souvent modèle et théorie sont de nature différente, le modèle décrivant la réalité en termes de catégories de la connaissance, la théorie ayant l'ambition de présenter la réalité telle qu'elle est. La théorie se veut avant tout réaliste. C'est ainsi que le modèle va faire intervenir ou mettre en valeur des concepts qui ne sont pas directement observables et sont le fruit de notre analyse cognitive. C'est le cas de la cause* ou de l'information* et même en un certain sens de la probabilité*. Le modèle est une interprétation de la nature avec une finalité explicative. Il appartient à l'épistémologie*, alors que la théorie ambitionne l'appartenance à l'ontologie*. Ce caractère épistémologique du modèle apparaît clairement dans deux formes privilégiées de modélisation : la simulation* et le simulacre*.

C'est dire que l'épistémologie classique a grand mal à rendre compte de l'extension extraordinaire de l'usage des modèles en sciences. Cette extension ne trouve pas sa place dans le dualisme théorie*/expérience*. Toute simplification des faits conduit à un modèle, d'où l'universalité des modèles. L'épistémologie conserve toute son autorité sur les disciplines mathématiques ou très mathématisées, mais a beaucoup de mal à traiter les disciplines moins mathématisées, par exemple les sciences humaines, ou celles ne disposant pas d'une seule théorie, par exemple la biologie qui est faite d'une multiplicité d'entre elles, ou la cosmologie*. Il y a maintenant beaucoup de travaux traitant de ces disciplines, mais presque toujours dans cette perspective où le concept de science est pensé à travers les concepts extraits de la mécanique. Par là, elle conserve dans un équilibre instable l'opposition entre science et idéologie sur beaucoup de problèmes scientifiques contemporains, où l'on ne peut travailler qu'avec un grand nombre de modèles qui sont hétérogènes, d'échelles* différentes et incomparables*. Ainsi le débat entre déterminisme* ou aléatoire* est une question de choix de modèle.

Ainsi le caractère réversible ou non réversible d'un phénomène naturel est aussi une question de modèle. La aussi, la question n'est bien posée (au sens mathématique d'un problème bien posé) que si elle concerne les descriptions que nous pouvons proposer de ce phénomène, et la réponse dépend de nouveau de façon essentielle de l'échelle à laquelle on se place. L'exemple de la diffusion ou celui de la cinétique chimique montrent que peuvent coexister une description

déterministe, discrète et réversible (à l'échelle microscopique), des descriptions stochastiques, continues et irréversibles (aux échelles intermédiaires, mésoscopiques) et une description déterministe, continue et irréversible (à l'échelle macroscopique).

L'arrivée du calcul numérique bouleverse le visage de la science. en substituant la pratique des modèles, à l'élaboration de théories* . Le livre de Stephen Wolfram, « A new kind of science », prone ainsi l'usage systématique des automates cellulaires* pour l'étude des problèmes des systèmes complexes*. Wolfram va plus loin en prétendant que de tels modèles sont réellement à l'œuvre dans la nature. L'univers comme un calculateur géant, héritier lointain de l'univers comme une horloge. L'univers comme automate cellulaire, générateur de sa propre complexité.

MODELE BIOLOGIQUE

MODELE CYBERNETIQUE

Le modèle cybernétique d'un système dynamique est obtenu par la construction d'un automate mathématique* où le système est représenté par une boîte noire* caractérisée par ses états*. Selon le cas on y adjoint un mécanisme de rétroaction*.

La cybernétique*, en tant que démarche de modélisation, apparaît donc comme la science des automates abstraits. Comme telle elle constitue un développement de la logique mathématique*.

La cybernétique a eu comme apport scientifique essentiel la définition du statut du modèle cybernétique, sans pour autant fournir de procédés généraux pour sa construction.

MODELE HAMILTONIEN

MODELE QUANTIQUE

Le modèle quantique d'un système microphysique est le modèle cybernétique* que la mécanique quantique associe à ce système, et se caractérise essentiellement par la définition de la notion d'état*

MODELE STANDARD DES PARTICULES ET DES CHAMPS

Le Modèle Standard des particules et des champs constitue une vision unifiée de la matière et des rayonnements, qui généralise la démarche initiale de la Mécanique Quantique. Il applique à toute matière et à toute force (champ) -gravitation exceptée pour le moment- une conception unitaire, généralisation des idées du dualisme onde-corpuscule*. C'est là l'épine dorsale de la Théorie Quantique des Champs*.

Toute particule est considérée comme le quanta* d'un champ quantique*. Tout champ exerce son action à travers des quanta-particules.

Il y a donc deux sortes de particules:

les particules de matière, leptons*- électrons, protons, neutrons- et quarks*, constituants fondamentaux de la matière.

les particules qui transportent les interactions*, comme le photon*, les gluons* et les bosons* W, Z et de Higgs*. Ce sont les quanta* des champs de jauge*.

Le Modèle Standard est la mise dans un même moule, celui des champs de jauge*, des trois théories fondamentales : l'électromagnétisme* (l'électrodynamique quantique*), la chromodynamique quantique* et la théorie des interactions faibles*. C'est une théorie de Grande Unification*.

L'achèvement de la théorie repose sur la démonstration de sa renormalisabilité*. La vraisemblance du modèle standard a été acquise au début des années 70 par la mise en évidence des courants neutres*, c'est-à-dire l'existence de processus d'interaction faible liés à l'échange de Z^0 et la découverte du quark charmé. Le modèle électrofaible et les théories de jauge acquièrent subitement une grande crédibilité et le couronnement aura lieu au début des années 80 avec la mise en évidence directe au CERN des bosons W et Z.

On surprend pourtant là la physique en flagrant délit. Ce que les écrits de vulgarisation se gardent bien de mentionner. La physique est comme un opéra. Pour la jouer il faut une machinerie qui en soi n'a aucun sens. Point de vue impitoyable mais réaliste sur la physique théorique qui est souvent un échafaudage sans aucun sens propre.

Le boson de Higgs* est le produit d'un échafaudage incroyable. Une cascade d'hypothèses entrelacées. Autant de concepts problématiques entassés les uns sur les autres.

Le champ*, le champ quantifié*, les quanta* comme particules*, le champ de jauge*, la brisure de symétrie*, le champ quantique de Higgs* et ses quanta, la renormalisibilité*, le boson de Higgs*. On atteint le sommet, mais l'entreprise va sans doute s'arrêter là.

Tout cela est un peu comme la construction d'une armoire en ajoutant des tiroirs les uns par-dessus les autres.

Walter Thirring, grand spécialiste de la théorie quantique des champs, a écrit un traité de physique théorique où il a essayé d'exposer les différents domaines avec un minimum de rigueur mathématique. Il a renoncé à écrire un volume sur la théorie quantique des champs parce qu'elle manquait d'une telle rigueur.

NON le boson de Higgs n'existe sans doute pas vraiment, même si on lui attribue la paternité de certains événements. Car ce serait faire injure à la véritable physique théorique et donner un gage aux petits débrouillards.

N'oublions par ailleurs jamais que la M.Q. n'est pas une théorie des particules, mais une théorie de leur observation à travers les détecteurs. Elle ne sait pas ce qu'EST une particule !!!!!

Une nouvelle théorie est nécessaire. La physique entre en crise.

MODELES (THEORIE MATHEMATIQUE DES)

MODELISATION

Reproduction de caractéristiques d'un objet sur un autre objet spécialement conçu pour leur étude. Ce nouvel objet est appelé modèle*. Le besoin de modélisation apparaît lorsque l'étude directe d'un objet est impossible, difficile, chère ou trop longue.

Entre le modèle et l'objet il doit exister une certaine similitude. Celle ci peut consister en une similitude des caractéristiques physiques, en une analogie de fonction ou en une identité de la description mathématique du comportement.

La représentation* de la connaissance* a de tout temps fait appel à la modélisation.. Rétrospectivement on peut en effet appeler « modèle » tout schéma de compréhension, une philosophie, un système ou une théorie*. Mais ni Ptolémée*, ni Copernic*, ni Galilée, ni Newton*, ni Darwin*, ni Marx* n'ont appelé leurs interprétations ou leurs théories des modèles. La formulation explicite du concept de

modèle en science n'apparaît que vers la fin du XIX^{ème} siècle (Maxwell*, Boltzmann*, Duhem*) et l'emploi délibéré de la modélisation est caractéristique de la seconde moitié du XX^o siècle dans le cadre de la cybernétique* et de l'informatique*. La simulation informatique (ex. simulation de Monte-Carlo) comporte en général une démarche modélisatrice.

MODERNITE (ORIGINES DE LA)

MODES NORMAUX

Un mode normal ou vibration normale ou vibration propre d'un système oscillant met en jeu un mouvement idéal collectif des parties oscillantes du système à une même fréquence. C'est le cas des atomes dans une molécule ou un cristal, ou des grains de sable sur une plaque révélant les modes normaux de celle-ci (Figures de Chladni). Dans les systèmes discrets le nombre de vibrations normales est fini alors que pour les systèmes distribués (barre, membrane, résonateur) il est infini dénombrable

Les modes normaux d'un système sont les solutions à diverses fréquences des équations du mouvement. Le mouvement le plus général global du système est la superposition des modes normaux. Les modes normaux sont en fait les états propres* d'un système dynamique linéaire à paramètres constants lorsque l'on donne une représentation avec opérateurs* des équations du mouvement. Lors de vibrations forcées du système il se produit des résonances* à des fréquences qui correspondent aux modes normaux. Le spectre* de résonance est le spectre des modes normaux.

Tout comme la notion de composante de Fourier* la notion de mode normal est une notion mathématique qui n'a pas d'objectivité en soi mais prend corps lors d'interactions. Les mêmes précautions épistémologiques sont de rigueur.

La notion de mode normal est très générale et elle apparait en filigrane dans le formalisme de la mécanique quantique où les états propres* s'introduisent parce que la théorie est construite sur la même base de l'algèbre linéaire*.

La théorie quantique des champs* procède à la quantification du champ en remplaçant les modes normaux du champ par des oscillateurs harmoniques quantiques*.

MOINDRE ACTION (PRINCIPE DE)

MOLECULE**MOMENT****MOMENT ANGULAIRE****MOMENT D'INERTIE**

Grandeur physique scalaire mesurant l'inertie* d'un corps dans un mouvement de rotation autour d'un axe, tout comme la masse* mesure l'inertie dans un mouvement de déplacement linéaire. Elle est caractérisé par la distribution de la masse dans le corps et égale à la somme des produits des masses composantes par le carré de la distance à l'axe.

MOMENT DIPOLAIRE**MOMENT MAGNETIQUE****MOMENT MAGNETIQUE DE SPIN****MOMENT MAGNETIQUE ANORMAL DE L'ELECTRON**

Différence entre le moment magnétique intrinsèque de l'électron (particule chargée de spin 1/2) et le moment calculé par la théorie de Dirac*.

Prévu théoriquement par J. Schwinger*, il a été mesuré par P. Kusch (Prix Nobel 1955 avec W.E. Lamb*).

Tout comme l'effet Lamb*, il résulte du couplage de l'électron avec le champ électromagnétique du vide, en particulier de la polarisation du vide*.

MONADE

Ce nom donné d'abord par les Pythagoriciens* à l'unité, qui n'était pas seulement pour eux un nombre abstrait, mais l'élément simple, générateur de tous les composés, a été repris par Leibniz*.

Pour ce philosophe des temps modernes, les monades sont aussi les éléments de toutes choses, ce sont des espèces d'atomes incorporels, des substances ou plutôt des forces* simples, douées de deux attributs essentiels : l'appétition, par laquelle elles tendent au mouvement, et la perception, par laquelle elles sont susceptibles de sentir. Leibniz veut que les monades soient inaccessibles à toute influence du dehors et n'exercent aucune action les unes sur les autres : il les frappe par là d'impuissance et se trouve ainsi conduit à l'hypothèse de l'harmonie préétablie*.

MONISME / PLURALISME

Le monisme est une attitude qui consiste à considérer la multiplicité des manifestations du monde en terme d'un seul principe, d'une seule base (substance) ou d'une seule idée. A l'opposé on parle de pluralisme et plus particulièrement de dualisme*.

Historiquement le monisme s'est exprimé par l'affirmation de l'existence d'un élément primordial comme l'eau (Thalès) ou le feu (Héraclite), ou par l'affirmation de la présence de la matière comme origine unique de toute chose ou phénomène (Matérialisme*).

L'Atomisme* antique était à la fois pluraliste et moniste, en ne considérant qu'une seule sorte d'atome. La chimie contemporaine est par contre résolument pluraliste, puisqu'elle considère que la matière sous son aspect habituel résulte des associations possibles d'une centaine d'éléments irréductibles les uns aux autres: les atomes* de la classification périodique*.

La conception du Vide Quantique* est par excellence une conception moniste puisqu'elle affirme qu'il existe un état de base d'où toute la matière émerge. Mais il est difficile de décider s'il s'agit là d'un monisme matérialiste* ou idéaliste*. Le Vide Quantique est par excellence comme l'Un* néoplatonicien.

La réalisation d'un monisme à partir d'un pluralisme a souvent recours ou fait apparaître un élément de médiation*.Le vide quantique est comme un médiateur mathématique dans la représentation* du "monisme onde-corpuscule".

MONOPOLE MAGNETIQUE

Electricité et magnétisme sont les deux faces d'une même réalité. Mais alors que l'électron* et le positron* ont une existence indépendante, le magnétisme se manifeste toujours par deux pôles aux propriétés opposées. L'aimant. On ne peut jamais séparer ces pôles, pour créer ainsi un monopôle magnétique.

Un tel monopôle peut être défini théoriquement, à l'instar de l'électron, à travers une théorie de jauge*.

Dans les années 1970, pour les physiciens travaillant à l'unification des forces, les monopôles magnétiques sont tout bonnement nécessaires à la théorie. Selon eux, ils sont très lourds, dix millions de milliards de fois plus qu'un proton, soit un centième de microgramme environ. Leur densité est même supérieure à celle de l'Univers... ce qui paraît déraisonnable. Il y a trop de monopôles, de quoi faire s'effondrer l'Univers. Heureusement, grâce à l'hypothèse de l'inflation, brutale expansion de l'Univers post-Big Bang, les monopôles sont plus dilués et l'Univers est sauf. Aujourd'hui, le problème est qu'il y a autant de modèles de monopôles que de modèles d'unification. Et autant de masses différentes.

Il existe cependant certains phénomènes étranges que d'aucuns attribuent à la production de monopôles magnétiques dans de très fortes décharges électriques. Des expériences de transmutation chimique à basse énergie. Dans les expériences d'Oroutskoïev, répétées des centaines de fois par lui-même et d'autres laboratoires, on obtient des transmutations nucléaires à faible énergie grâce à une étincelle électrique dont l'énergie est très faible (quelques keV).

On a fait appel à une autre théorie, proposée par Georges Lochak, Elle décrit un monopôle très léger, voire de masse nulle. Il découle non pas des théories d'unification mais de l'équation de Dirac. Celle-là même qui décrit l'électron et a fait découvrir l'antimatière. C'est un neutrino magnétique.

MONTE-CARLO (Cf. Simulacre de Monte-Carlo)

MORPHISME

MORPHOGENESE (Cf. Forme*)

MORPHOGENESE BIOLOGIQUE

Le problème central de la biologie du développement* est de comprendre comment les formes* et les structures* se mettent en place. De la masse initiale presque homogène des cellules en division dans un embryon émerge l'organisation spatiale complexe de l'organisme*. Les gènes jouent bien sûr un rôle dans la morphogénèse mais ne disent rien, pas plus d'ailleurs que la biologie moléculaire*, sur ses mécanismes profonds.

Certaines des premières idées sur la manière dont la croissance biologique peut être modélisée et comprise sont dues à D'Arcy Wentworth Thompson* et Alan Turing*. Ces travaux postulaient la présence de signaux chimiques et de processus physico chimiques comme la diffusion*. Le mathématicien anglais, a cherché à jeter les bases mathématiques d'une théorie de la morphogénèse*. Dans un article publié en 1952, intitulé : *The chemical basis of morphogenesis* il a montré comment une réaction chimique couplée à un phénomène de diffusion* (réaction-diffusion*) pouvait conduire à des distributions périodiques dans l'espace des concentrations de certaines espèces chimiques. Selon Turing, un système de substances chimiques appelées "morphogènes" diffusant à travers les tissus rend adéquatement compte du phénomène principal de morphogénèse. On a depuis lors découvert un certain nombre de morphogènes, mais il n'est pas clair s'ils agissent en biologie selon le mécanisme proposé par Turing. On a cependant trouvé en chimie des exemples de formes engendrées par réaction-diffusion selon le schéma de Turing.

Un morphogène est une substance gouvernant la forme de développement des tissus, diffusant à travers le tissu à partir d'une source localisée. Les morphogènes agissent typiquement en se liant à des récepteurs protéiques spécifiques. Une importante classe de molécules impliquées dans la morphogénèse sont les protéines facteurs de transcription qui déterminent le sort des cellules en interagissant avec l'ADN. Le facteur de transcription est une protéine qui se lie à des parties spécifiques du DNA et participe à la transcription de l'information génétique du DNA au RNA.

MOT

Signe* linguistique, servant à désigner des objets*, leurs qualités et leurs caractéristiques, leurs interactions, ainsi que des objets imaginaires ou abstraits créés par la pensée. Le nom* est un mot particulier.

Le débat entre nominalisme* et réalisme* est vivant en ce qui concerne le mot. On peut proposer une interprétation réaliste en faisant appel à la psycho-linguistique.

Il y'a un lien entre les "mots" et les émotions. Ces mots qui prétendent désigner (ou étiqueter) des éléments réels, existant, palpables, lesquels s'avèrent très souvent après examen douteux, diffus et parfois même inexistant. En ce sens, la plupart des mots sont des mot-creux, des mot-valises, et même souvent des valises vides (des étiquettes soigneusement posées sur des flacons... vides et destinés à le rester). Exemple en physique, le mot rebattu de photon*, dont tout le monde pense que c'est une particule (ou encore un "grain") de lumière, alors que c'est une entité mathématique correspondant au quantum élémentaire d'un mode électromagnétique (au débouché d'un bricolage ad hoc). Rien à voir avec un électron*, quand même plus objectivable en terme de particule quasi-ponctuelle pourvue d'une masse, d'une position, même diffuse au sens quantique (et pas seulement d'une impulsion comme le photon).

Les mots désignent en fait bien plus objectivement du..subjectif ! Les mots s'associent en effet bien mieux à la subjectivité qu'à la réalité qu'ils prétendent poser (par quel mécanisme ? Cela reste à voir et les neurosciences ont du pain sur la blanche à cet égard). Un simple mot peut nous faire rougir, trembler, nous exciter, sans qu'il s'y associe nécessairement une représentation immédiate et objectivable. Les mots ont donc un contenu, mais il n'est pas de l'ordre du réel, mais bien plus de l'émotionnel (le détecteur de mensonges, ce ridicule appareil des années 50 et du maccarthysme, avait au moins ceci de juste dans sa démarche qu'il prétendait rechercher la vérité au travers de manifestations émotionnelles déclenchées par un questionnement, c.a.d. par des mots. C'était oublier tous les artefacts possibles et simplifier à l'extrême le fonctionnement émotionnel).

La poésie est l'art d'associer des mots, de façon non descriptive, pour stimuler "en direct" des émotions, en amont des objets qu'elle prétend décrire (au moins depuis Mallarmé et Appolinaire, on a commencé à se détacher volontairement et consciemment de la poésie descriptive, ce qu'elle n'est jamais au demeurant, selon une démarche parallèle à l'émergence de la peinture abstraite et de l'éclatement des formes pour faire surgir plus directement des émotions en amont de celles-ci).

Les mots paraissent fonctionner comme des hologrammes*: ils se sont inscrits en nous à la suite d'un processus d'apprentissage et de confrontation avec le réel où se mêlent le contingent et le nécessaire, le décor objectif et bien plus encore son environnement émotionnel tel qu'il prévalait au moment de l'apprentissage, et ils nous permettent de restituer des émotions virtuelles (heureuses ou au contraire fuies et enfouies dans des recoins où nous les avons prudemment exilées) lorsqu'un éclairage (sommaire, comme en holographie, ou un peu d'énergie sans information suffit à restituer dans toute sa complexité une image 3-D) qui est une réminiscence fortuite, s'impose à nous ou encore que nous le stimulons de l'intérieur. Le mot restitue alors le contenu d'une expérience humaine passée (et enrichie de toute l'histoire du sujet depuis l'inscription de l'hologramme, ce qui le distingue d'un hologramme physique, qui ne peut que se dégrader), faite de pôles attracteurs et répulsifs, entre lesquels il s'agit de ne pas trop se laisser balloter, dont il faut être conscients pour ne pas en être dupe et le jouet. Ceci nous amènerait à traiter des chimères et en l'occurrence des mot-chimères, dans lesquels nous déversons des trop plein d'émotions et qui peuplent plus ou moins heureusement nos imaginaires.

Joseph Zyss

MOTEUR MOLECULAIRE

MOUVEMENT

Au sens le plus général de ce mot*, le mouvement représente le changement dans l'espace au cours du temps. Le mouvement englobe tous les processus qui se déroulent dans la nature et la société. C'est un attribut* essentiel de la matière*, une des conditions de son existence. La matière sans mouvement est impensable, tout comme le mouvement sans matière. La source du mouvement est dans l'unité et le conflit des contraires, propres à la matière elle-même, dans le jeu des attractions et des répulsions (forces*) présentes au cœur de tout événement physique.

L'énergie* est la mesure quantitative générale du mouvement et des interactions*. L'énergie appartient au corps en mouvement.

La force est la cause des modifications du mouvement, c'est ce qu'exprime la loi de Newton: $\text{force} = \text{masse} \cdot \text{accélération}$. En l'absence de force un mouvement se maintient perpétuellement inchangé. La

force est extérieure au corps en mouvement. Il n'y a pas de force sans mouvement, il y'a du mouvement sans force.

Le mouvement de la matière est absolu alors que tout repos est relatif, et ne représente qu'un des moments du mouvement. Un corps au repos par rapport à la terre est en mouvement avec elle par rapport au soleil, en mouvement avec le soleil par rapport au centre de la galaxie..... Dans la mesure où le monde est infini tout corps participe à un nombre infini de déplacements. La stabilité qualitative des corps et la stabilité de leurs propriétés est le résultat de l'interaction et du mouvement de leurs constituants. De ce fait la mouvement détermine les propriétés*, l'organisation structurale et le caractère de l'existence de la matière, particules élémentaires* y compris.

La théorie quantique des champs* en particulier conduit à une conception des particules élémentaires* où ce sont leurs transformations continues les unes dans les autres qui constitue l'essence même de leur existence.

Le mouvement de la matière est multiforme et divers dans ses manifestations, depuis le plus simple mouvement mécanique jusqu'aux processus complexes biologiques et sociaux.

MOUVEMENT BROWNIEN

Mouvement désordonné de petites particules en suspension dans un liquide ou un gaz, qui se produit sous l'effet des chocs des molécules environnantes. Découvert par le botaniste anglais R. Brown en 1827, la théorie en a été donnée par A. Einstein* en 1905 en se fondant sur l'hypothèse des chocs moléculaires. La vérification expérimentale de la théorie d'Einstein par J. Perrin en 1907, comportant la détermination du nombre d'Avogadro*, a constitué la première preuve irréfutable de l'existence réelle des atomes et des molécules. « Les atomes existent puisqu'on peut les compter » s'est exclamé H. Poincaré*.

La trajectoire d'une particule soumise au mouvement brownien est hautement complexe et enchevêtrée. Elle est une image saisissante de la réalisation d'un processus aléatoire* et reflète le type de hasard* qui intervient dans le mouvement des atomes et des molécules.

A l'échelle atomique, le phénomène est parfaitement déterministe: il se présente comme une succession de collisions élastiques entre un grain et des molécules de vitesses bien déterminées, suivant les lois de la dynamique newtonienne

On peut ainsi développer un modèle totalement déterministe, à l'échelle des molécules. Un des buts est de justifier *l'hypothèse de chaos*

moléculaire qui, depuis Boltzmann, fonde l'édifice de la mécanique statistique*. Cependant, on n'a pas accès en pratique à la vitesse initiale de chacune de ces molécules, et leur nombre est beaucoup trop grand pour pouvoir décrire l'ensemble des degrés de liberté associés; de plus, le caractère chaotique de la dynamique déterministe microscopique rend irrémédiablement imprédictible le mouvement observé aux échelles supérieures. On choisit donc de décrire statistiquement l'influence des collisions moléculaires, ce qui conduit à divers modèles stochastiques pour la description du mouvement à l'échelle du grain.

Les théories du mouvement brownien sont des théories générales du mouvement d'une particule sous l'effet d'une force aléatoire. Il est d'usage de scinder cette force en deux parties dont l'une dépend du mouvement de la particule et l'autre pas : sa moyenne statistique*, qui s'identifie à une force de frottement* et une partie fluctuante, à moyenne nulle, où se concentre l'aspect aléatoire. Entre frottement dissipatif et fluctuations s'établit une relation dite de fluctuation-dissipation*. C'est la même force aléatoire qui cause le mouvement erratique de la particule qui s'opposerait à son mouvement si elle était poussée dans le liquide.

La première relation de ce type a été établie par Einstein pour le mouvement brownien lorsqu'il a montré que le coefficient de diffusion qui caractérise l'aspect aléatoire est proportionnel à la viscosité du milieu qui traduit le frottement.

Cette séparation d'un même phénomène en deux termes a pour but de donner une interprétation physique* à chacun des termes. Elle va jouer un grand rôle dans l'application de la théorie du mouvement brownien au mouvement d'une particule chargée dans son propre champ électromagnétique (réaction de rayonnement*), en particulier dans les travaux fondateurs de la théorie quantique d'Einstein sur le rayonnement du corps noir*

MOUVEMENT PERPETUEL

MOYENNE STATISTIQUE

MUON

MUSIQUE

La musique est un art et une science issus de la perception auditive de phénomènes acoustiques. C'est donc comme la couleur* un phénomène psycho-physique, où des phénomènes oscillatoires (oscillations acoustiques ou oscillations électromagnétiques) déclenchent une réaction cérébrale spécifique produisant une sonorité ou une couleur. En musique à la différence de l'acoustique* il n'y a pas de sons, il n'y a que des sonorités. Le son est un être acoustique, la sonorité est une excitation perçue comme passage d'un état sonore à un autre. Le son est absolu la sonorité est relative. La musique est un art de rapports. Un son isolé ne saurait rien exprimer. L'expression naît lorsque du rapprochement de plusieurs sons résulte la perception d'une série de rapports, rapports de hauteurs ou de fréquences, et structuration du temps qui s'exprime dans le rythme. La théorie de la musique rencontre des difficultés liées à la conciliation douloureuse de l'acoustique et de la perception sonore. Ce sont les pratiques et les conventions de cette conciliation qui sont le tissu des complications et des diversités du domaine musical.

La musique a toujours été partagée entre une quête de scientificité et une conception globale et idéaliste. Il y avait déjà en Grèce une conception de la musique opposée à la démarche pythagoricienne celle qui est exposée dans les *Eléments harmoniques* d'Aristoxène de Tarente, disciple d'Aristote qui entend fonder la théorie musicale non sur les nombres mais sur la perception auditive.

Tout comme pour la couleur, la musique est un phénomène perceptif et cérébral. Là aussi la difficulté se trouve dans l'établissement d'un rapport entre les caractéristiques physiques (acoustiques) du son musical – évolution temporelle, transitoires, analyse spectrale et fréquences.....- et les caractéristiques psychologiques (musicales) – hauteur, timbre, tonalité, consonance, dissonance, harmonie.....-. D'un côté il y a les paramètres de la stimulation de l'oreille et de l'autre les attributs de la sensation auditive. C'est le cas pour la fréquence et la hauteur (frequency and pitch). D'un côté la théorie du signal et de sa réception, de l'autre les lois de la sensation musicale, la théorie de la musique. Ce sont les difficultés qu'éprouvera le physicien allemand Gustav Helmholtz* dans son monumental ouvrage de musicologie physiologique (1862).

Le son est caractérisé par sa hauteur et sa durée, son intensité et son timbre Ceci lui donne un caractère autonome et contrôlable qui le distingue clairement du bruit* et se trouve lié à son mode de production par des instruments de musique. Les rapports entre les hauteurs sont perçus comme des intervalles entre les sons

correspondants. De ce point de vue le cerveau (ou l'oreille ?) fonctionne comme un logarithme naturel : il transforme les produits en sommes et les divisions en différences. Un intervalle correspondant à un rapport de 1,03 est en général perçu par une oreille humaine exercée. L'intervalle correspondant à un rapport de 1,01 est en général imperceptible. L'intervalle correspondant à un rapport deux (dénommé octave) joue un rôle privilégié dans la théorie musicale.

Depuis Pythagore on sait que les hauteurs des sons produits par une corde tendue sont proportionnelles à sa longueur. Cette représentation des hauteurs musicales par des longueurs qui durera jusqu'au XVII^{ème} siècle marquera profondément les conceptions de l'harmonie* en général comme ajustement des proportions géométriques.

C'est là sans doute la première loi physique découverte par l'humanité. On comprend l'extraordinaire influence exercée par cette découverte et par le rôle qu'elle fait jouer à la musique dans la compréhension du monde, de l'âme humaine au cosmos. Ce n'est qu'au XVII^{ème} siècle, chez Galilée* et Mersenne* et surtout Joseph Sauveur, que l'on identifia la hauteur à la fréquence (en fait au logarithme de la fréquence) de l'oscillation qui constitue le son. En utilisant le phénomène de battements Sauveur parvint à déterminer le nombre absolu des oscillations d'un son donné. On s'aperçût alors que le rapport de nombres de vibrations définissant un intervalle entre deux sons, étaient, inversés, exactement les mêmes que ceux des longueurs de cordes qui les produisaient. Ainsi sans le savoir Pythagore avait découvert le principe applicable non seulement à la matière qui produit le son, mais encore au son lui même considéré dans son essence vibratoire. L'étude ultérieure des vibrations possibles d'une corde confirmera ce lien entre longueur et oscillations (propres), ce qui constitue un des résultats phares de la physique mathématique*. C'est ce caractère oscillatoire, matérialisé par la fréquence, qui donne au son musical sa particularité, et le fait reconnaître dans un matériau sonore complexe.

Pour des raisons psychiques et culturelles on distingue dans la musique occidentale un certain nombre de sons de référence. On appelle gamme une succession de sons de référence, appelés notes, choisis dans l'échelle générale des sons perceptibles, ordonnés en séries régulières et employés dans la composition musicale. A partir d'une note de référence les diverses notes de la gamme sont définies à l'intérieur d'une octave. L'être humain perçoit un son de fréquence donnée et le son de fréquence double comme « la même note » (l'une étant simplement déclarée « plus haute » que l'autre). Selon les

intervalles dont elle se composera on distinguera différents types de gamme. Une gamme constitue un cadre tonal à l'intérieur duquel s'exprime toute mélodie. Dans la musique occidentale on distingue essentiellement trois types de gammes. La gamme diatonique formée par la succession do-ré-mi-fa-sol-la-si. Entre deux do ce sont les 7 touches blanches du piano. Elle est composée de cinq tons et deux demi tons. Il est possible d'ajouter à l'échelle diatonique un certain nombre de notes intermédiaires, placées à peu près au milieu de chaque ton diatonique. Dans ce cas, la gamme ainsi *amplifiée*, prend le nom de gamme chromatique. La gamme tempérée formée par 12 notes se succédant de demi tons en demi tons résultant du partage de l'octave en douze parties égales. L'établissement de la gamme tempérée, est une sorte de compromis rendu nécessaire par les progrès de la musique instrumentale, la construction des instruments à sons fixes, la tendance à la modulation et au chromatisme. Introduite par Werkmeister, J.-S. Bach en consacra l'adoption par son recueil de 48 préludes et fugues, intitulé *Le Clavecin bien tempéré*. En faussant systématiquement les rapports des intervalles consonants, la gamme tempérée divise l'octave en 12 demi-tons égaux, dont le rapport s'exprime par la formule $\sqrt[12]{2}$.

Joseph Sauveur donna aussi l'explication du phénomène fondamental de la musique, la consonance entre les sons dont les hauteurs sont entre elles comme des nombres entiers simples, ce qui constitue le fait musical majeur de l'impression subjective d'affinité que donne la perception de certains sons par rapport les uns aux autres. Deux sons simultanés dont les fréquences sont liées par de tels rapports ne produisent aucun battement. Cette propriété est mise à profit pour l'accord des instruments de musique, l'une des deux notes de l'intervalle étant modifiée jusqu'à ce que le battement s'annule ou prenne la valeur voulue si l'intervalle doit être tempéré. Ces intervalles privilégiés (intervalles purs) entre les hauteurs ont même reçu des noms particuliers, l'octave (rapport 2), la quinte (rapport 2/3), la quarte (rapport 3/4), la tierce majeure (rapport 4/5) et la tierce mineure (rapport 5/6). Ces dénominations rappellent que ces intervalles sont ceux entre les notes de la gamme diatonique, la première et la huitième, la première et la cinquième, la première et la quatrième. Si l'on divise l'intervalle d'une octave en douze intervalles, appelé chacun un demi-ton, les intervalles privilégiés s'obtiennent approximativement en ajoutant à la hauteur d'origine un nombre entier de demi tons : 3 (tierce mineure), 4 (tierce majeure), 5 (quarte), 7 (quinte) et 12 (octave). Mais il y'a entre une quinte juste et une quinte tempérée une petite distance. Très petit intervalle, appelé comma, qui ne se note pas dans la pratique musicale, mais qui se fait

sentir à une oreille délicate dans le jeu des instruments à intonation variable et spécialement dans le jeu du violon. Il s'exprime par le rapport 80/81. En fait il y'a plusieurs commas qui expriment chaque fois des intervalles plus petits que le demi-ton, et qui peuvent être l'intervalle entre sept octaves pures et douze quintes pures, l'intervalle entre une tierce pythagoricienne et une tierce pure.

A ces principes, en somme acquis, les acousticiens ont tenté de donner un point d'appui scientifique. Sauveur, le premier a supposé que l'absence de *battements* caractérise la consonance; il a été suivi par Euler*; Helmholtz* a fondé sa théorie sur les rapports des sons et proposé une hiérarchie plus compliquée de *consonances absolues* (unisson 1/1, octave 2/1), *parfaites* (quinte 3/2, quarte 4/3), *moyennes* (sixte majeure 5/3, tierce majeure 5/4), *imparfaites* (tierce mineure 6/5, sixte mineure 8/5). Mais on s'est demandé à quel point devait s'arrêter la série et quel était le plus simple, du rapport de la tierce majeure (5/4) ou de la neuvième majeure (9/4).

Lorsqu'il publie son « Traité d'harmonie » en 1722 Rameau ignorait les travaux de Sauveur. Mais ses considérations théoriques sont bien souvent confirmées par Sauveur. Le traité de Rameau eu un retentissement énorme, et Rameau quelques années plus tard intégra les conceptions de Sauveur à ses écrits.

Sauveur fit aussi intervenir le phénomène des harmoniques. Un son entendu est rarement pur, certains disent même jamais. Normalement s'y superposent des sons plus faibles qui se fondent avec lui, et qui se définissent par un nombre d'oscillations qui est un multiple simple exact de celui du son principal appelé fondamental. Toute production d'un son par vibration d'un objet s'accompagne toujours de la production simultanée d'harmoniques et c'est cet ensemble que l'on appelle note. Un son pur à fréquence unique n'existe pas dans la nature et ne peut être produit qu'électroniquement. C'est l'existence de ces sons harmoniques partagés pour certains entre les sons définis par les intervalles primordiaux qui explique le phénomène de consonance ou bien encore d'harmonie*. Sauveur définissait la consonance par l'absence de battements qui se produit en présence d'harmoniques communes. En 1877, Hermann Helmholtz* fonde la consonance sur la structure harmonique interne des deux sons formant un intervalle musical : lorsque les fondamentales des deux sons sont dans un rapport simple, par exemple 3/2 certaines parmi les premières harmoniques de la série coïncident, ici la deuxième et la troisième, créant un sentiment de fusion agréable. Lorsque ce n'est pas le cas, certaines harmoniques proches sans être égales provoquent des battements (« la rugosité ») qui perturbent l'audition et sont identifiés

comme dissonances. Ce qui semblait une jonglerie arithmétique où dominait la conception pythagoricienne du rôle des nombres, se transforme tout d'un coup en une application élémentaire de l'outil mathématique le plus puissant d'une partie de la physique l'analyse de Fourier*. Le rapport constant entre « musique et mathématiques* » acquiert ainsi un véritable statut et ouvre la voie à un avenir fertile.

Ce sont ces harmoniques qui ont conduit à la construction de l'échelle des sons utilisée dans le monde occidental. L'intensité des différentes harmoniques dépend de l'instrument. Seule la fondamentale est bien perçue dans une flûte. Par contre les cuivres ont en général des harmoniques d'intensité fort importantes ce qui leur donne leur éclat.

Toute la complexité de la musique vient de ce qu'elle s'exprime selon des échelles de sons différentes, qui oscillent entre les échelles culturelles de la gamme (division « arbitraire » de l'octave) et l'échelle naturelle des consonances. Les diverses théories et stratégies de composition s'articulent sur les énormes possibilités de combinatoire offertes par l'adoption de ces différentes échelles. On appelle tempérament le système des intervalles d'une gamme apparaissant dans une de ces échelles. A strictement parler le tempérament consiste à répartir les intervalles de la gamme sur les instruments à sons fixes de manière à ce que leur hauteur soit un compromis acceptable entre l'inaccessible exactitude acoustique des harmoniques naturelles consonantes et le système harmonique en usage.

Pour construire une échelle de sons on peut par exemple utiliser le « cycles des quintes ». On choisit un son de référence. La quinte est associée à la troisième harmonique, soit un son d'une fréquence triple. Si l'on utilise une procédure classique dans la théorie des systèmes dynamiques de ramener tout à un intervalle donné, ici l'octave, ce que les mathématiciens appellent calculer modulo l'octave et consiste à retirer de chaque intervalle autant d'octave qu'il est possible, la troisième harmonique devient la quinte de fréquence $3/2$. La quinte de la quinte ramenée à l'octave aura une fréquence de $9/8$. de proche en proche on construit des sons dont les fréquences ramenées dans l'octave ont pour valeurs des quotients de puissances de trois par des puissances de deux. Bien évidemment il ne s'agit pas d'un cycle car une telle suite ne revient pas à sa position initiale. Une puissance entière positive de trois ne peut être égale à une puissance entière positive de deux, un nombre impair ne pouvant être égal à un nombre pair. Mais la douzième puissance de trois (531441) est très voisine de la dix neuvième puissance de deux (524288), le quotient valant 1,0136, intervalle de fréquence difficile à distinguer de l'unisson, que l'on

appelle le comma pythagoricien. Il s'ensuit que dans la suite des notes du cycle des quintes la douzième est difficilement distinguable de la première, et les douze premières notes de cette suite diffèrent fort peu des douze notes de la gamme tempérée.

Les mêmes considérations sont valables pour n'importe quel cycle de consonances. L'espace harmonique possède cette particularité tout à fait étonnante que selon le chemin emprunté pour aller d'une note à une autre (ici dans le premier cas selon le cycle des quintes, dans le second cas selon les octaves) l'espace parcouru n'est pas le même.

Le tempérament est la façon dont est monnayé sur les différents intervalles le comma résiduel, et chaque époque ou chaque culture a proposé des solutions différentes.

On peut facilement résumer la multiplicité des tempéraments à trois grands types correspondant d'ailleurs à trois périodes bien définies de l'histoire de la musique. En effet il y a une différence fondamentale entre les tempéraments où les quintes et les quartes sont justes et les tierces sont fausses (tempéraments pythagoriciens, période médiévale), ceux où tierces et quintes sont privilégiés (tempéraments zarliniens, périodes renaissance et baroque) et celui où tous les intervalles sont approximatifs et égaux (tempérament égal du XVIII^{ème} siècle à nos jours). Seul l'intervalle le plus simple celui d'octave a toujours gardé la même définition.

L'avènement de la gamme tempérée, division de l'octave en douze parties égales, a radicalement transformé l'évolution de la musique occidentale. Ce tempérament égal est une solution purement mathématique et une aberration harmonique, où tous les intervalles, hormis l'octave, sont faux. La quinte naturelle correspond à un rapport de fréquences de 1,5 alors que la quinte tempérée correspond à la racine douzième de deux soit 1,4983. Les musiciens cherchaient un moyen de jouer juste et plus facilement ensemble. La gamme tempérée a permis la création des ensembles instrumentaux de l'orchestre symphonique. Cette simplification musicale a permis une plus grande largesse dans l'écriture musicale.

Le tempérament est l'acte primordial par lequel les musiciens établissent une collection de sons prélevés dans le continuum sonore et régis par une loi mathématique. C'est le premier moment de l'organisation musicale. C'est un choix aussi fondamental que, pour les langues, la constitution d'un système de sons articulés différentiables, les phonèmes, qui seuls seront utilisés dans le langage, à l'exclusion de tout autre. Car il existe, en musique comme en linguistique, une double articulation du langage sur le fait sonore naturel : constitution d'une gamme discrète de phénomènes sonores différentiables (pour notre

musique depuis trois cent ans, les douze demi tons égaux de l'échelle tempérée), puis élaboration d'un langage harmonique tirant parti des potentialités de cette échelle. Mais une révolution silencieuse a profondément transformé la musique de notre temps, c'est la fin de la musique par demi tons égaux. Ou plus exactement c'est le développement, parallèlement à la poursuite de la musique tempérée de musiques (le pluriel s'impose) reposant sur d'autres paradigmes harmoniques que celui du tempérament égal, de musiques qui ne s'écrivent plus avec douze demi tons égaux, mais avec une toute autre collection de sons. Il y a une ouverture de l'harmonie à toutes sortes de division de l'octave, et irruption dans le domaine du musicable des sons complexes, des bruits*, des sons transformés par électroacoustique ou informatique produisant des objets sonores que l'on ne peut plus comme les notes de la gamme répartir régulièrement selon une échelle. Ainsi, *Metastasis* de Xenakis (1955) a été créé par l'usage exclusif de glissandi, un continuum sonore qui est la négation de la division de l'octave. Le paradigme même de la musique occidentale, la division égale du continuum sonore préalable à toute écriture musicale, est battu en brèche par la musique contemporaine.

L'expression musicale est construite sur l'alternance de moments de tension et de moments de détente. Cela correspond à la présence simultanée de deux forces contradictoires qui sont la consonance et l'attraction, les forces vives de la musique.

La consonance est ce qui permet à plusieurs sons émis simultanément de se fondre en une sonorité globale. La consonance constitue dans le langage musical l'expression privilégiée de la détente. La dissonance désigne la discordance d'un ensemble de sons produisant une impression d'instabilité et de tension, et nécessitant une résolution par détente.

Le son physique est un phénomène complexe car s'il s'accompagne toujours de l'existence simultanée d'harmoniques, il est toujours lors de sa production précédé par une période plus ou moins courte par un son dont la fréquence n'est pas stabilisée, un son transitoire. C'est une partie du signal à évolution rapide, correspondant à l'attaque et à la décroissance de ce signal. Dans un morceau de musique classique jusqu'à 70 % du son musical est constitué de transitoires, même si le conditionnement culturel donne à l'auditeur occidental le sentiment de n'entendre que la partie harmonique (les notes).

Ceci apparaît clairement lorsque l'on effectue une analyse du son pour révéler sa composition en fréquences (spectre*) en fonction

du temps. C'est l'image d'un signal dans une représentation fréquence-intensité, en fonction du temps. Le temps est porté en abscisse, la fréquence en ordonnée et l'intensité de chaque composante est représentée par la couleur, la noirceur ou l'épaisseur de la trace correspondante. On réalise ainsi ce que l'on appelle un sonagramme. C'est l'image d'un signal dans une représentation fréquence-intensité, en fonction du temps. Le temps est porté en abscisse, la fréquence en ordonnée et l'intensité de chaque composante est représentée par la couleur, la noirceur ou l'épaisseur de la trace correspondante. On utilise une analyse de Fourier* numérique avec une fenêtre que l'on fait glisser tout au long de la durée du son. L'intérêt est la possibilité de voir l'évolution spectrale au cours du temps, cette évolution étant, par exemple, essentielle dans la définition du timbre d'un instrument. Cette analyse fait partie aujourd'hui des techniques classiques de traitement du signal*. Le sonagramme est comme l'empreinte digitale d'un son reflétant son identité profonde.

La musique est un domaine exemplaire où la complexité du phénomène (Cf. Musique et complexité*) provoque une multiplicité de points de vue non nécessairement exempts d'influences culturelles (Cf. Musique et culture*). Les défis qu'elle propose et les enjeux qu'elle active s'articulent dans le passage du matériau sonore à l'espace symbolique*. Ce qui induit une réflexion valable pour toutes les sciences naturelles sur le rapport du physique au symbolique de la représentation*. On y voit clairement comment les contraintes de la représentation*, le signe * et l'écriture, loin d'accomplir une simple transcription imposent des points de vue perçus comme quasi ontologiques*.

MUSIQUE ET BIOLOGIE

Ce n'est que récemment que la musique a entamé un dialogue fécond avec les sciences cognitives*, la neuro-physiologie en particulier.

A l'égal du langage* la musique existe dans toutes les formes de sociétés humaines, ce qui laisse penser que l'être humain naît avec un cerveau musical qui le prédispose à écouter de la musique et à en créer. A l'instar du langage* la musique aurait un caractère inné et universel.

On a pu poser la question de savoir où se trouve le cerveau musical. Il existe effectivement des régions cérébrales associées spécifiquement à la perception et à la mémoire musicales. Mais alors

que le langage est attribué pour l'essentiel aux réseaux de l'hémisphère cérébral gauche, la musique serait « distribuée » dans les deux hémisphères du cerveau. La complexité du phénomène musical vient du « divorce » entre l'émotion musicale et la connaissance musicale. Le cerveau distingue entre l'émotion et la cognition. La musique affecte l'une et l'autre mais par des voies séparées. L'expérience émotionnelle précède temporellement l'expérience cognitive, ce qui tend à confirmer que l'expérience esthétique est une dialectique entre la surprise émotionnelle et le décryptage cognitif (Cf. Esthétique mathématique*).

Le fait que dans le cerveau certains réseaux neuronaux sont exclusivement dédiés au traitement de la musique, semble prouver que la musique loin d'être une simple activité ludique remplit un rôle biologique. A la différence du langage la musique sert plus à communier qu'à communiquer, car la musique sert à renforcer la cohésion du groupe. On chante pour s'unir. Lorsque l'on danse ensemble on vise à ne former qu'un seul corps en mouvement. La musique n'est pas qu'un simple jeu pour l'esprit. Elle répond à un besoin biologique. Un besoin d'appartenance. Dans l'évolution* de notre espèce le cerveau musical aurait été un avantage adaptatif retenu par la sélection naturelle*.

MUSIQUE ET COMPLEXITE

Il est pertinent de parler pour la musique de système* musical dont l'organisation révèle une complexité* certaine. En fait, conformément au rôle du point de vue dans la définition d'une complexité*, il n'y a pas une complexité intrinsèque mais différentes complexités dépendants du type de considération que l'on développe sur le fait musical. On peut ainsi s'intéresser à la complexité de structure du langage musical ou à la complexité de l'acte de perception du phénomène sonore musical. La complexité concerne la pensée compositionnelle, l'interprétation instrumentale et la difficulté perceptive. Une complexité qui se prête à une analyse scientifique est la complexité liée à l'écriture, que l'on peut appeler complexité traumatologique. A cette complexité de l'écriture, se juxtapose une complexité de la perception, en fait de l'aperception, perception cognitive mais inconsciente, sous influence culturelle.

MUSIQUE ET CULTURE

Tout autant qu'un phénomène psycho-physique la musique est un phénomène culturel, car la perception et la composition de la

musique dépendent de la culture* et la musique est une composante importante de la culture mais variable selon les époques. C'est la culture qui décide de ce que l'on considère comme de la musique. Ainsi la culture occidentale restreint la musique aux phénomènes stationnaires de l'acoustique musicale-les notes et les consonances- et l'auditeur ordinaire croit entendre dans une partition musicale une succession de notes alors que les trois quart du temps occupé par le son est constitué par les transitoires*. C'est là un effet de l'éducation musicale.

Même en se cantonnant aux systèmes fondés sur les notes, l'histoire et la culture fournissent une multiplicité extraordinaire de tempéraments. Des systèmes de la Grèce ancienne aux systèmes orientaux les systèmes musicaux subissent des influences philosophiques et culturelles qui marquent les différentes divisions de l'octave utilisées. Ainsi le système indien divise l'octave en vingt deux parties inégales.

MUSIQUE ET DYNAMIQUE

La musique est un phénomène dynamique.

MUSIQUE ET INFORMATIQUE

Si les techniques d'enregistrement et de reproduction du son ont profondément influencé le développement de la musique dans la première moitié du XX ème siècle, l'apparition de l'ordinateur marque une révolution dans la production et la composition de la musique (CF. Musique et technologie acoustique*). La période de 1940 à 1960 voit l'apparition de la technologie nouvelle de l'ordinateur dans une atmosphère où s'élaborent aussi de nouvelles théories scientifiques comme la cybernétique* et la théorie de l'information*. Cette période voit aussi s'affirmer des démarches de composition modernes ou avant gardistes (musique concrète, musique électronique, musiques sérielles, musiques formelles) plus ou moins influencées par cette ambiance scientifique et technique.

Les ordinateurs ne travaillant qu'en binaire* ne peuvent traiter le signal sonore qu'après numérisation*. Celle-ci consiste en l'échantillonnage du signal sonore et en la conversion binaire des valeurs d'échantillonnage. Ce sont ces valeurs binaires qui sont manipulées par l'ordinateur pour effectuer des transformations, et le son peut être récupéré par des auditeurs lors d'un décodage.

La synthèse directe par ordinateur, c'est-à-dire la création d'un signal sonore à partir de nombres calculés par la machine, remonte au milieu des années 50. Les Bell Telephone Laboratories commencent

alors à s'intéresser à la transmission de la voix sous forme numérique. A partir de 1957 Max Mathews y a inventé et développé la synthèse musicale par ordinateur. L'ordinateur utilisé l'IBM 704 est un ordinateur à lampes programmé en assembleur, et encore peu performant.

A partir des années 60 l'apparition des ordinateurs à transistors et des langages de programmation évolués (FORTRAN, ALGOL...Langage C) renforce les liens entre musique et informatique. Avec ces langages l'interface homme/machine s'opère plus aisément.

L'ordinateur est d'une part utilisé pour écrire des partitions de notes de musique jouées ensuite par des instrumentistes, et étudier les partitions composées depuis plusieurs siècles. Il permet d'autre part de produire et d'entendre des sons, sans recourir à des musiciens interprètes, et de mieux connaître les sons en général.

Cette situation est concrétisée par l'apparition du nouveau terme d'informatique musicale et s'institutionnalise par l'apparition de centres de recherche musicale comme le MIT ou l'IRCAM. A partir des années 80 le développement de la microinformatique entraîne une implication croissante des industriels et avec elle l'importance nouvelle des logiques économiques. Avec le protocole MIDI (Musical Instrument Digital Interface), accord entre industriels, on aboutit à normer les échanges d'information entre différents systèmes techniques. L'intégration de l'informatique dans le matériel de base fabriqué par les industriels d'instruments de musique électronique donne une importance nouvelle aux dimensions économiques de la musique.

MUSIQUE ET MATHEMATIQUES

Si l'application d'outils mathématiques à la musique représente l'illustration la plus commune des relations entre mathématiques et musique, la musique peut à l'inverse constituer un objet de recherche en soi pour les mathématiques. C'est que la musique par delà le caractère émotionnel qui lui est associé produit des structures mathématiques au sens strict dans la mesure où elle privilégie les relations entre objets aux dépens des objets eux-mêmes. La musique comme les mathématiques est un langage, et les mathématiques sont bien souvent le langage de la musique.

La musique est un art et une science où l'art a toujours eu beaucoup de mal à s'imposer au dépens de la science. Pendant des siècles la musique était considérée comme une partie du savoir humain

englobée dans la mystique du nombre. Dans le quadrivium médiéval la musique était subordonnée à l'arithmétique. La musique et les nombres ont entretenu une relation profonde et constante pendant toute l'histoire de la civilisation occidentale. Relation profondément renouvelée à l'époque contemporaine par l'utilisation des mathématiques modernes et de l'ordinateur. Dialogue fécond, non sans frictions, entre « harmonistes par calcul » convaincus de l'intérêt de la théorie et « harmonistes par l'oreille » défendant la supériorité de la perception. La conviction était que la musique est une science mathématique, conviction encore bien répandue. Descartes l'affirmera sans ambages dans son traité latin sur la musique et Rameau le répétera après lui dans la préface de son *Traité d'Harmonie* de 1722. A travers la musique on accède à une vision de la structure de l'univers et de son harmonie, dont Platon a dans le *Timée* laissé une illustration saisissante.

Il faudra attendre le début du XVIIIème siècle pour reconnaître que la musique est un phénomène psycho-physique, lorsque Joseph Sauveur établit que la hauteur d'un son est la fréquence de la vibration sonore et que les harmoniques jouent un rôle dans la consonance. La physique remplace alors la mathématique, introduisant avec elle la richesse des considérations dynamiques à propos des phénomènes sonores et de leur engendrement. Helmholtz*, le grand physicien, jeta les bases physiques et psycho physiques de la consonance et de l'harmonie. Ce n'est que dans les années 1930 que l'on prendra pleinement conscience de la complexité du son musical, phénomène non linéaire complexe de nature en général auto-oscillatoire, aussi riche en états stationnaires qu'en transitoires. Ouvrant ainsi la voie à une théorie approfondie du fonctionnement des instruments de musique et à une injection massive des moyens électroniques et informatiques dans les opérations d'engendrement du matériau sonore.

On assiste alors à un retour des mathématiques dans la composition musicale. Lorsqu'il est question du lien entre mathématiques et musique au vingtième siècle, le nom de Iannis Xenakis est souvent un des premiers à être évoqué. En effet, dès *Metastasis* (1953-54) l'ingénieur devenu architecte et compositeur multiplie les créations d'oeuvres composées à l'aide de principes issus des mathématiques – du calcul des probabilités* jusqu'à la théorie des groupes* - seul point de départ possible pour échapper, selon lui, à la "pensée linéaire" dans laquelle l'ensemble des compositeurs de son époque s'étaient fourvoyés.

La démarche xenakienne part d'un parti pris : la musique a besoin de l'apport des mathématiques pour pouvoir évoluer. Ceci est, après tout, loin d'aller de soi et sous-entend une grande confiance dans le pouvoir des mathématiques à assumer un rôle prédominant dans la création musicale.

On peut aujourd'hui exprimer bon nombre de considérations arithmétiques de la théorie et de la pratique musicale dans un langage moderne utilisant les méthodes de l'algèbre* et en particulier celles de la théorie des groupes*. Mais ceci ne suppose pas l'idée d'une nature objective et préexistante de la musique, de nature mathématique. Les systèmes musicaux n'ont pas été créés par la nature mais ils ont été produits par l'être humain pour rendre possible la musique à l'intérieur d'un certain contexte. D'une certaine manière la théorie musicale est une activité de modélisation* mathématique de structures musicales. A ne pas confondre la structure-modèle avec la structure essence, comme cela a été trop souvent le cas dans une interprétation erronée du structuralisme*.

MUSIQUE ET PHILOSOPHIE

De par son lien profond avec la culture la musique est une vision du monde*. Car le lien entre musique et mathématiques n'est pas un simple lien technique mais reflète l'idéologie que transporte le formalisme mathématique. Dès son origine la théorie musicale occidentale se trouve liée à la philosophie nommément à la philosophie pythagoricienne où tout est Nombre puis à la philosophie aristotélicienne chez Aristoxène de Tarente. C'est encore là l'opposition platonisme/aristotélisme* d'un monde idéal figé dans la mathématique et d'un monde où le mouvement crée les formes à travers les phénomènes physico-acoustiques.

Il ne faut donc pas s'étonner de voir de grands philosophes s'intéresser de près à la musique. Au XVII^{ème} siècle Descartes* s'intéresse à la musique. Descartes entame son œuvre philosophique par un *Abrégé de musique* (1618), non publié de son vivant. Il la conclura par un traité des *Passions de l'âme* (1649) qui réalise le programme suggéré à la fin de son essai de jeunesse. La musique semble ainsi encadrer l'ensemble de son œuvre sans pour autant constituer un vecteur explicite de ses grands textes philosophiques. L'*Abrégé* initie le projet cartésien de prendre philosophiquement mesure d'un remaniement général des pensées contemporaines — en particulier des rapports entre mathématiques (y compris les rapports internes entre arithmétique, géométrie et nouvelle algèbre) et physique

(ce temps est celui de Galilée) —, la musique lui apparaissant comme premier terrain d'exercice philosophique pour caractériser, dans ces nouvelles conditions, ce que *penser, raisonner* et *calculer* veut dire.

Au XVIII^{ème} siècle Leibniz* montre son intérêt pour la musique dans de nombreux fragments. La lettre à Goldbach du 17 avril 1712 est célèbre :

"Au reste, je pense que la raison des consonances doit être cherchée à partir de la coïncidence des coups <congruentia ictuum>. La musique est une pratique occulte de l'arithmétique dans laquelle l'esprit ignore qu'il compte. Car, dans les perceptions confuses ou insensibles, [l'esprit] fait beaucoup de choses qu'il ne peut remarquer par une aperception distincte. On se tromperait en effet en pensant que rien n'a lieu dans l'âme sans qu'elle sache elle-même qu'elle en est consciente. Donc, même si l'âme n'a pas la sensation qu'elle compte, elle ressent pourtant l'effet de ce calcul insensible, c'est-à-dire l'agrément qui en résulte dans les consonances, le désagrément dans les dissonances. Il naît en effet de l'agrément à partir de nombreuses coïncidences insensibles. D'ordinaire, on fait un mauvais compte en n'attribuant à l'âme que les opérations dont elle a conscience. [...] Dans l'octave un coup sur deux de l'une des séries de coups coïncide avec chaque coup de l'autre série. Dans la quinte chaque troisième [coup] d'une série et chaque second de l'autre se conjuguent."

On découvre que Leibniz, loin d'être *pythagoricien*, fait sienne la théorie dite de la *coïncidence des coups*.⁽³⁴⁾ Cette théorie, que Descartes*, Galilée*, Mersenne avaient adoptée, représente en quelque sorte la meilleure explication du phénomène de la consonance, dans l'ignorance où l'on est alors de la vraie nature du son et du véritable fonctionnement de l'oreille humaine. Elle est séduisante pour un mathématicien, car elle lui permet de donner une raison physique à la mise en correspondance des intervalles avec les rapports numériques. On sait qu'Euler*, dans son *Tentamen novae theoriae musicae* (1739), en déduit toutes les implications les plus complexes: des formules de classement des intervalles, mais aussi des formules de classement des accords, les règles de l'harmonie elles-mêmes!

Le siècle des Lumières tout en voyant s'affirmer à travers le newtonianisme une pensée des lois naturelles, favorable au pythagorisme musical, voit émerger une prise en compte de l'homme, qui va déboucher sur le Romantisme, et orienter les théories de la musique vers des aspects psychiques. De la musique dans les choses à

la musique dans l'âme. Alors que Rameau, auteur de la première synthèse de la musique harmonique, fonde son système sur un phénomène physique, la résonance du corps sonore, Rousseau* trouve dans cette ambition l'indice d'une erreur fondamentale, qui consiste à rabattre tous les effets de la musique sur les ressources purement physiques qui caractérisent l'harmonie des modernes :

"L'harmonie ne fournit aucun principe d'imitation par lequel la musique formant des images ou exprimant des sentiments se puisse élever au genre dramatique ou imitatif, qui est la partie de l'art la plus noble, et la seule énergique ; tout ce qui ne tient qu'au physique des sons, étant très borné dans le plaisir qu'il nous donne, et n'ayant que très peu de pouvoir sur le cœur humain "

(Dictionnaire de musique).

Rousseau défend la primauté de la mélodie par rapport à l'harmonie.

On voit donc la musique au XIX ème et au XX ème siècles participer à ce grand mouvement philosophique qui va remettre l'homme au centre de l'univers et qui prend son origine dans l'œuvre de Kant* et dans le kantisme*. La musique est pensée du côté de l'intériorité subjective uniquement ; la musique est entièrement du côté de l'âme. En tout cas les conceptions de la musique participent des conceptions antiréalistes qui s'expriment dans le positivisme logique* et sa problématique du langage* et la phénoménologie* d'obéissance husserlienne avec sa problématique de la perception*. L'influence de Husserl* est manifeste chez des théoriciens comme Ernest Ansermet (*Les Fondements de la musique dans la conscience humaine*, véritable somme approchant la musique dans sa totalité par la physiologie, les mathématiques, la philosophie et l'histoire.) ou Pierre Schaeffer (*Traité des objets musicaux*)

MUSIQUE ET PSYCHOLOGIE

Les principales conceptions théoriques qui prévalent dans le domaine de la psychologie générale*, à telle ou telle période des XIX ème et XX ème siècles, se retrouvent en psychologie de la musique.

MUSIQUE ET SIGNE

La musique est avec la mathématique et le langage...et la chimie, l'exemple d'un domaine du savoir donnant naissance à une notation précise. Ecrire permet de penser différemment l'objet à transcrire, et de s'en abstraire pour penser le signe*, la représentation*. Une fois la notation musicale établie au XVIème siècle, les compositeurs se sont emparés de cette écriture pour élaborer une véritable pensée sur le signe.

La théorie musicale occidentale s'est en premier lieu construite sur des rapports harmoniques entre les hauteurs. De ce paradigme émergent en particulier la notion de consonance et la prédominance du paramètre des hauteurs. D'autres cultures ne se concentrent pas autant sur les rapports harmoniques de hauteurs. Certaines accordent plus d'importance aux rythmes, aux couleurs des timbres, ou aux évolutions temporelles du son.

A partir du XIII ème siècle, l'écriture musicale occidentale sépare clairement le complexe sonore en trois paramètres indépendants de hauteur, de rythme et de dynamique. Pour chacun de ces paramètres, la notation emprunte des descripteurs discrétisés. Pour les hauteurs un alphabet de sept signes ; do, ré, mi, fa, sol, la, si, accompagnés de quelques accents - altérations de dièse et de bémol, signes d'octaviation, clefs.... La rythmique de la musique occidentale s'appuie sur la traditionnelle représentation des figures de notes et de silences. Ronde, blanche, noire, croche...pour les durées. Pause et soupirs pour les silences. L'intensité d'un son (on dit aussi la *force*) est la caractéristique permettant de distinguer un son fort d'un son faible ; les musiciens parlent de nuances pour exprimer la dynamique créée par les différents niveaux d'intensité. Il s'agit, en termes scientifiques de l'amplitude de la vibration, qui se mesure en décibels. Dans la musique occidentale, une nuance est un signe (quatorze signes) noté sur une partition qui indique l'intensité relative d'une note, d'une phrase, ou encore d'un passage entier d'une œuvre musicale (p piano, f forte). Les nuances permettent au musicien de restituer la dynamique de l'œuvre lors de son interprétation. Cette réduction sémiotique du complexe musical en trois alphabets indépendants a certainement privilégiés les logiques combinatoires autonomes sur ces paramètres et permis l'extraordinaire complexité de la musique occidentale, en particulier la polyphonie. A contrario cette réduction sémiotique réduit une évolution temporelle continue du complexe sonore et de ses différentes composantes spectrales à un son harmonique fixe, un fondamental (le point noté sur la partition), à une durée fixe (la valeur rythmique) et à une nuance. Avec ce type de notation il semble en particulier impossible de transcrire et de

composer des phénomènes transparamétriques et des sons où les partiels évoluent dans des directions différentes, comme si hauteurs, rythmes et nuances étaient des phénomènes séparés ce qui est acoustiquement faux (une fréquence fixe est par exemple une variation temporelle périodique d'amplitude).

MUSIQUE ET TECHNOLOGIE ACOUSTIQUE

Les innovations technologiques de la fin du XIX^{ème} siècle ont radicalement changé la conception du son dans la musique occidentale. L'enregistrement et la transduction électroacoustique (microphones et haut-parleurs) ont permis de fixer les sons sur des supports matériels tangibles (d'abord sur microsillons puis sur bandes magnétiques en attendant les supports numériques). Le son enregistré n'était dès lors plus un phénomène insaisissable, perceptible dans une conjonction de conditions particulières, mais devenait un objet concret, observable et manipulable. On est passé comme en science d'un phénomène naturel occasionnel à un objet défini par la méthode expérimentale*. Cette « matérialisation » du son lui donnait la condition nouvelle d'objet musical en soi. Ceci a permis de nombreuses expériences*amenant un contrôle et une compréhension nouvelle des phénomènes sonores, contribuant ainsi à un profond renouvellement de la pensée et de l'écriture musicale. Il ne s'agissait plus alors de composer avec les sons, mais de composer le son lui-même, dans une démarche qui s'apparente à une autopoïèse* musicale. Comme le dit Stockhausen :

« les compositeurs ne peuvent plus considérer les phénomènes sonores comme acquis, mais aspirent à faire pénétrer autant que possible leurs conceptions formelles dans les sons, afin d'atteindre une nouvelle correspondance entre matériau et forme, entre une microstructure acoustique et une macrostructure musicale ».

Le son est caractérisé de manière nouvelle. Le timbre considéré comme structure essentielle d'un son, prend alors une place centrale dans la composition.

Les avancées technologiques ont ainsi guidé le développement de la musique électroacoustique, faisant appel à des modes de production sonore synthétiques, dont les précurseurs tels que Edgard Varèse, Karl Heinz Stockhausen ou Iannis Xenakis explorèrent l'univers sonore à l'aide des premiers synthétiseurs et magnétophones analogiques.

Dans la période qui couvre le XIX^{ème} siècle et se prolonge et se prolonge jusqu'à la deuxième guerre mondiale, malgré des progrès

énormes dans les domaines de l'acoustique et de la transmission des sons, il existe un décalage persistant entre la modernité musicale et le monde scientifique et technique. Au cours de cette période d'ébranlement du système tonal de composition, l'élaboration de nouvelles formes de structuration de la musique (Debussy, Schoenberg, Stravinsky, Varèse) et, plus encore, l'importance croissante accordée au timbre des sons trouve peu de nouveaux fondements dans les dernières inventions scientifiques et techniques. Les grands événements scientifiques de cette époque, la théorie de la relativité* ou la mécanique quantique*, les travaux de Gödel* ou Turing* en logique mathématique*, n'ont aucune influence sur la musique.

Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale, dans l'atmosphère scientifique et technologique de la cybernétique*, de la théorie de l'information* et de l'informatique naissante, que la musique est touchée par un renouvellement de ses pratiques (Boulez, Schaeffer, Barbaud, Xenakis, Mathews, Risset) dans le domaine de la composition et de la synthèse du son. Des centres de recherche musicale se mettent en place (IRCAM)

L'apparition des technologies numériques* et de l'informatique* est une nouvelle étape décisive d'une portée tout aussi importante sur la création musicale. Le son représenté par une suite de nombres sur un support numérique (disque dur ou compact disque) se « concrétise » davantage mais s'abstrait à la fois de son support, ce qui lui permet d'être fidèlement restitué, transmis, analysé. Avec le numérique les manipulations sur les objets sonores ne sont plus limitées par les contraintes et la relative imprécision des supports physiques antérieurs. On coupe, colle, mélange, et déforme les sons à l'aide de logiciels de plus en plus puissants et précis. On profite au maximum des techniques numériques d'analyse et de traitement du signal*. La synthèse numérique offre un potentiel illimité en matière de création de timbre et de structures sonores.

Le développement des technologies numériques en concentrant l'attention sur le signal sonore, en favorisant la technique aux dépens de l'esthétique, rend plus difficile le rapport entre le signal* et le signe* musical, entre l'acoustique pure et l'univers symbolique* de la musique. La technologie ne simplifie en rien la problématique de la composition musicale, quoiqu'elle offre des possibilités de composition assistée par ordinateur (CAO), où la notion de modélisation* intervient largement. (Cf ; Musique et informatique*).

MUSIQUE (INSTRUMENTS)

Le son émis par les instruments de musique provient de deux types de vibrations, celles des cordes frappées ou pincées (piano, guitare) ou des jets d'air dans un tube (flute), vibrations libres, et celles des instruments entretenus où cordes ou colonne d'air effectuent des autooscillations* (violon, orgue, clarinette, hautbois, saxophone...).

L'étude des instruments entretenus a bénéficié du développement de la théorie des systèmes dynamiques* et de la théorie des autooscillateurs* stimulée par l'exploitation des oscillations non linéaires apparaissant dans les émetteurs radio et les circuits électroniques. Leur fonctionnement repose sur une boucle de rétroaction où une source excitatrice (anche, archet, lèvre..) est couplé à un résonateur (tuyau, corde, membrane). Le résonateur cède de l'énergie sous la forme d'un rayonnement acoustique, perçu par nos oreilles. Le résonateur joue deux rôles, celui d'oscillateur siège d'un cycle limite* et de transmetteur de la rétroaction* qui module la source excitatrice (modulation du débit d'air dans l'anche d'une clarinette, frottement entre l'archet et la corde dans le cas d'un violon). L'émission d'une note résulte d'un couplage compliqué entre l'excitateur et le résonateur, et requiert en permanence des ajustements très fins de la part du musicien. Le mécanisme d'autooscillation implique d'une manière fondamentale la non linéarité de l'excitateur et de son couplage avec le résonateur. C'est cette non linéarité qui se manifeste dans l'expressivité des sons produits, en particulier par l'apparition de régimes transitoires*.

Aucun son musical réel n'est stable et les musiciens savent aussi que leur façon d'attaquer et de terminer un son joue un rôle essentiel dans sa qualité et son timbre, à tel point souvent que la trajectoire du son devient plus importante que sa structure accomplie même. La naissance et l'extinction d'un son constituent donc des transitoires d'attaque et d'extinction. Au vu des transitoires de tel ou tel instrument – leurs empreintes digitales en quelque sorte – et presque toujours à eux seuls, on peut distinguer de quel instrument il s'agit. Et si l'on coupe la tête des notes enregistrées d'un violon ou d'un hautbois ces instruments ne sont plus reconnaissables. Il n'est plus possible de distinguer un hautbois d'une trompette s'ils sont amputés de leur attaque. Les transitoires occupent d'ailleurs en grande partie l'espace sonore et l'audition de la musique leur fait tout autant place qu'aux instants stationnaires des notes de fréquence données. C'est l'effet de la culture occidentale de prétendre donner plus d'importance aux états stationnaires qu'aux transitoires manifestée par le solfège ou la partition.

Les conditions de l'excitation constituent des paramètres qui en variant provoquent l'apparition d'une modification qualitative du comportement de l'instrument, une bifurcation*. La bifurcation la plus commune est la bifurcation de Hopf* qui est responsable de l'apparition d'un son périodique, ce qui est le cas en soufflant de plus en plus fort dans un instrument à vent ou en augmentant la vitesse de l'archet sur la corde du violon. Mais les régimes d'oscillation observés sur un instrument de musique ne sont pas toujours périodiques, loin s'en faut. Lors d'une bifurcation un son peut apparaître, disparaître, changer de fréquence, devenir apériodique- quasipériodique* (multiphonique ou note rugueuse) ou chaotique*(note très rugueuse ou instable).

Par delà leur aspect fonctionnel les instruments de musique traditionnels présentent un aspect esthétique qui dénote une fonction symbolique* certaine. Tout dans l'instrument renvoie au corps humain dont il est parfois représentation*, dont il est toujours prolongement et substitut. Le corps est l'instrument musical primordial-chants, sifflets, battements de mains....., et les instruments de musique ont connu une évolution technique qui perfectionne et prolonge les performances sonores du corps. L'instrument à travers sa forme et sa décoration continue de manifester symboliquement ce rapport au corps. C'est ce qui fait que l'on peut avec la promotion de l'ordinateur au rang des instruments de musique parler d'une véritable discontinuité culturelle. Rien en lui ne rappelle plus l'origine charnelle de l'instrument.

MUTATION BIOLOGIQUE

Les mutations sont des modifications aléatoires de la séquence des nucléotides* dans l'ADN* lors de sa réplication. Les séquences erronées sont alors copiées comme les séquences originales.

MYTHE

Le mythe est l'élément d'un mode de pensée fondamental des sociétés communautaires: la mythologie. Le monde y est envisagé entièrement à l'image de ces sociétés où les fonctions d'organisation n'ont pas été clairement dégagées des relations de parenté. Le monde comme un clan.

Sans le rattacher précisément à des caractères sociaux, le mythe est, plus généralement, un mode de pensée sans cesse présent dans l'histoire, jusque et y compris dans la science contemporaine.

Le mythe comporte une différenciation imprécise du sujet et de l'objet, du signifié* et du signe*, des choses et des mots, des êtres et de leurs noms, des relations spatiales et temporelles, de l'origine et de l'essence. L'explication des objets et du monde s'y ramène souvent à un récit sur l'origine et la création.

Ces caractères donnent au mythe un rôle essentiel d'unification d'aspects divers et souvent incompatibles, dans un seul récit.

De ce point de vue, l'objet quantique*, ainsi que le dualisme onde-corpuscule*, constituent des mythes de la physique, car ils expriment dans le langage ordinaire, avec ses multiplicités de description souvent contradictoires, une réalité abstraite unique, définie dans le monde des mathématiques.

Pour remplir ses objectifs, le mythe mobilise la fiction. G. Dumézil disait qu'il avait passé toute sa vie à essayer de comprendre la différence entre le conte et le mythe.

De fait le dualisme onde-corpuscule n'hésite pas à mobiliser une onde fictive (l'onde de probabilité de la fonction d'onde*) et des particules fictives (les particules virtuelles*).

Le Vide dans son statut d'être et de non être, de chose sensible et intelligible, de présence et d'absence, est la source constante d'un jeu entre pensée mythique et pensée rationnelle.

NANOMONDE

En dessous de notre millimètre, dernière borne visible à l'œil nu, nous quittons les rivages du monde macroscopique et entrons dans un univers de plus en plus ambigu. Jusqu'au millième de millimètre, le millionième du mètre, le micron, nous restons dans une zone où la loupe et le microscope optique nous permettent de restaurer une vision directe des choses. A cause des phénomènes de diffraction, le grossissement atteint rarement plus de 1500. Mais cela suffit pour voir les microstructures de la nature, cellules, bactéries, microcristaux. La racine micro vient du grec et signifie petit. Au niveau du micron, le monde est petit mais encore visible. Au delà du dixième de micron, on s'enfonce dans un territoire inconnu où les dimensions s'expriment en nanomètres. Du grec nano, nain, la racine nano est utilisée pour noter le millième du millionième. Un nanomètre, c'est le millième de micron.

Le nanomonde est le monde à l'échelle de quelques dizaines ou dixièmes de nanomètres. C'est le monde des atomes, des groupements d'atomes, des molécules, petites ou grandes. Entre deux atomes dans une molécule, la distance est de quelques dixièmes de nanomètre. Le dixième de nanomètre, c'est le fameux Angström du nom d'un physicien et astronome suédois, Anders Iona Angström (1814-1874), un des fondateurs de la spectroscopie*. Il a mesuré avec beaucoup de précision les longueurs d'onde des raies du rayonnement solaire et constitué en 1869, le premier atlas de ces raies. Ces raies et d'une manière générale celles des spectres atomiques, correspondent à du rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde se situe dans une zone allant de quelques centaines à quelques milliers d'angströms, c.a.d. quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres.

La lumière des atomes se trouve en général dans le nanomonde. Mesurer la longueur d'onde d'une lumière atomique, c'est effectuer une mesure dans le nanomonde. Un double décimètre ou un pied à coulisse n'y suffisent plus, et cela non pas tant parce que c'est petit, mais surtout parce que, n'étant pas visible directement ce que l'on mesure n'est pas véritablement défini à la manière des objets visibles.

Disons qu'il existe des profondeurs du réel au delà du nanomonde, lorsque nous pénétrons dans l'univers des particules élémentaires. Le diamètre d'un proton est à l'échelle du millionième de nanomètre et celui de l'électron (de masse 2.000 fois plus petite que celle du proton) est encore mille fois plus petit. En dessous, ce sont nos conceptions de l'espace -temps qui vacillent, mais de toute façon le proton et l'électron sont déjà dans un univers que l'on ne peut décrire sans faire intervenir relativité restreinte et mécanique quantique.

Pour ce qui est du temps, les échelles sont un peu différentes.

Ainsi, si la seconde est au niveau du centimètre ou du millimètre, la picoseconde (millionième du millionième de seconde), la femtoseconde (millième de picoseconde) ou l'attoseconde, qui peuvent sembler hors de notre portée (ce qui est le cas pour le picomètre ou le femtomètre), se manifestent dans des phénomènes spectroscopiques liés aux rayonnements de certains lasers. On peut observer en effet des impulsions lumineuses qui ne durent qu'une picoseconde, une femtoseconde..et même une attoseconde. Ces rayonnements permettent d'observer des phénomènes dynamiques ultra rapides comme la relaxation des excitations électroniques et vibratoires dans les molécules, les mouvements moléculaires internes, les étapes élémentaires des réactions chimiques, les étapes initiales des réactions chimiques dans la photosynthèse et la vision.

Ainsi le nanomonde sera défini comme un monde intermédiaire où l'univers classique et l'univers quantique(et relativiste) viennent en contact. C'est ce qui en fait la richesse et bien souvent l'ambiguïté.

Comment définit-on ce que l'on mesure lorsque l'on ne le voit pas et comment le mesure-t-on ?

Pour mesurer une caractéristique d'un objet invisible il est nécessaire de se donner un modèle* représentatif de cet objet. La mesure va consister à observer un phénomène macroscopique dont on a établi le rapport avec un élément constitutif du modèle. Car il n'y a pas de véritable mesure, c.a.d. de mesure directe, qu'à l'échelle du laboratoire, dans notre univers macroscopique visible. Toutes les autres mesures sont indirectes et relient via des modèles théoriques, des caractères du modèle à des nombres qui apparaissent dans des phénomènes visibles. Toutes les mesures liées au nanomonde sont des mesures indirectes de ce type. Elles supposent un modèle de l'objet microscopique et un appareil de mesure amplificateur, c.a.d. un appareil sensé palper l'objet microscopique et en donner un écho à notre échelle. La qualité de l'écho, dépend bien évidemment de la pertinence du modèle et de notre aptitude à caractériser le mécanisme de l'amplification.

Si le modèle relève de la physique classique cette correspondance ne rencontre pas d'autres difficultés que techniques.

Si le modèle est quantique on va rencontrer de véritables difficultés conceptuelles liées au statut de la mécanique quantique et de la théorie de la mesure qui lui est associée.

Toute mesure dans le nanomonde suppose donc le choix préalable d'un modèle classique ou quantique.

On peut s'étonner de ce que le recours à une théorie classique ou à une théorie quantique soit un choix du physicien et que la nature

n'ait pas déjà choisi pour lui. Cela va à l'encontre d'une croyance bien établie dans la culture scientifique moyenne de notre époque, où l'on identifie microscopique et quantique. Vous avez dit nano, vous avez dit quantique.

Il n'en est rien, car on est en fait en présence de deux modes de description de la réalité tout à fait distincts sur le plan conceptuel. Le choix de l'un ou de l'autre va dépendre de ce que l'on privilégie en tant que phénomène étudié. Parler du nanomonde peut contenir en soi l'idée d'une prolongation continue du monde macroscopique par réduction des dimensions spatiales. On conserve les images de la physique classique en se bornant à changer d'échelle. Mais le nanomonde n'est pas qu'une question d'échelle, mais une question d'interactions et d'organisation. On a le choix entre différents modèles.

NANOSCIENCE

La nanoscience est la science des systèmes présents dans le nanomonde*. Les nanosystèmes sont étudiés non seulement pour leur structure mais aussi pour leur propriété fonctionnelles. Ainsi s'agit-il par exemple des propriétés électroniques et mécaniques de molécules individuelles, de la cinétique des moteurs moléculaires* ou de la physico-chimie de nanoclusters. De nombreux exemples de nanosystèmes se présentent dans les systèmes biologiques, où l'ensemble des structures d'une cellule appartient au nanomonde. L'importance du nanomonde vient de ce qu'il représente l'échelle juste au dessus de celle des atomes, qui marque le début de la complexification de la matière qui va s'étendre à des échelles de plus en plus grandes avec des mouvements corrélés sur des temps de plus en plus longs. C'est l'échelle où émerge le comportement collectif des atomes ou des molécules. Mais à cette échelle les fluctuations moléculaires jouent un rôle considérable et ceci requiert le recours à une description statistique des nanosystèmes hors équilibre.

On rencontre des spécificités de ce nanomonde*, placé entre quantique et classique. Des phénomènes quantiques connus apparaissent (effet tunnel*), d'autres nouveaux se manifestent, comme la quantification de la conductivité électrique ou de la conductivité thermique (les électrons ou la chaleur circulent par paquets).

Comme souvent en science, le développement de la nanoscience s'appuie sur l'invention de deux instruments permettant d'observer et d'interagir avec la matière à une échelle atomique ou subatomique. Les deux s'appuient très ingénieusement sur l'utilisation d'une simple

pointe métallique. Que ne peut on faire avec un clou ! Ils constituent une microscopie* dite en champ proche

Le premier est le microscope à effet tunnel (STM pour Scanning Tunneling Microscope) qui a été inventé en 1981 par deux chercheurs d'IBM (Gerd Binnig et Heinrich Rohrer), et qui permet de parcourir des surfaces conductrices ou semi-conductrices en utilisant un phénomène quantique, l'effet tunnel*, pour déterminer la morphologie et la densité d'états électroniques des surfaces qu'il explore. Une pointe explore une surface conductrice et l'on assiste au passage d'un courant entre elles, par effet tunnel. Microscopie par effet tunnel et microscopie électronique* à haute performance entrent en concurrence

Le second est le microscope à force atomique (AFM pour Atomic Force Microscope) qui mesure les forces d'interactions entre une pointe et la surface explorée. Cet outil permet donc, contrairement au STM, de visualiser les matériaux non-conducteurs.. Ces instruments combinés avec la photolithographie permettent d'observer, de manipuler et de créer des nanostructures.

En 1985 on a découvert une nouvelle forme allotropique du carbone, la molécule C_{60} constituée de 60 atomes de carbone répartis sur les sommets d'un polyèdre régulier formé de facettes hexagonales et pentagonales. Chaque atome de carbone a une liaison avec trois autres. Cette forme est connue sous le nom de buckminsterfullerène ou buckyball et doit son nom à l'architecte et inventeur américain Richard Buckminster Fuller qui a créé plusieurs dômes géodésiques dont la forme est analogue au C_{60} .

Plus généralement, les fullerènes dont fait partie le C_{60} , sont une nouvelle famille de composés du carbone. Non équilatéraux, leur surface se compose d'une combinaison d'hexagones et de pentagones à l'instar des facettes d'un ballon de football. Cette disposition leur confère des structures toujours fermées en forme de cage de carbone. On obtient aussi des nanotubes de carbone ou des plans de graphite (graphène).

La nanoscience couvre un champ très large de thématiques et sa définition même ne va pas toujours sans confusions. Parmi les thèmes les plus répandus, citons : l'électronique de spin ou spintronique, l'électronique moléculaire et quantique et la nanophotonique moléculaire, la nanochimie et la fabrication de matériaux à l'échelle nanométrique. En biologie une grande partie des constituants et des mécanismes cellulaires se trouvent à l'échelle du nanomonde. La manipulation de molécules uniques (ADN*, protéines*, moteurs

moléculaires*) ouvrent une fenêtre irremplaçable sur les processus mis en jeu à l'échelle moléculaire, ce qui en permet la modélisation.

La nanoscience résulte à la fois de progrès dans les techniques de microscopie et dans les procédés de manipulation de la matière. Elle découle aussi de la volonté d'étudier le nanomonde afin d'en décrire les propriétés spécifiques, une démarche inaugurée dès 1959 par un discours fameux de Richard Feynman et popularisée par un livre prophétique de Eric Drexler en 1986. La nanoscience, par son caractère interdisciplinaire, est une des révolutions scientifiques de ce début de siècle.

NANOTECHNOLOGIE

La nanotechnologie est le contrôle des structures et des réactions à l'échelle du nanomonde*, soit une manipulation à l'échelle moléculaire. La nanotechnologie se base sur les connaissances des « nanosciences* ».

Les manipulations de la nanotechnologie sont de deux types.

"Du haut vers le bas" pour la fabrication d'éléments miniatures par le façonnage de la structure désirée à partir d'un morceau macroscopique du matériau, comme c'est le cas dans la fabrication des composants électroniques (circuits intégrés*) par lithographie.

" Du bas vers le haut" pour la construction de la structure recherchée, atome par atome ou molécule par molécule, comme c'est le cas dans l'épitaxie* moléculaire ou l'ingénierie moléculaire.

Les produits de la nanotechnologie sont en général des objets artificiels*, n'existant pas dans la nature. Nouvelles molécules, nouveaux matériaux, systèmes électriques et mécaniques minuscules. Ces produits forment un monde à part dont le rapport avec la nature reste problématique. Comparée aux technologies macroscopiques conventionnelles, la nanotechnologie entretient avec la nature un rapport différent car elle peut s'infiltrer subtilement dans la nature d'une manière incontrôlée.

Mais la nanotechnologie permet aussi de créer de nouvelles utilisations de produits naturels, en les introduisant dans des dispositifs ou des processus artificiels.

Une grande partie des projets courants en nanotechnologie consiste à progresser dans la miniaturisation de la technologie, en particulier dans l'électronique*. Il s'agit de reproduire à l'échelle nano les composants électroniques traditionnels (interrupteurs, diodes, transistors*...). Ceci participe de l'effort pour augmenter les capacités

de stockage de l'information. Ainsi avec les techniques modernes de croissance cristalline telle l'épitaxie* par jet moléculaire, il est possible de fabriquer des structures semiconductrices extrêmement petites dans lesquelles le gaz d'électrons est étroitement confiné suivant une, deux ou même trois directions de l'espace. Dans ces structures, la nature quantique des électrons est manifeste et l'on parle alors, suivant le confinement, de puits, fils ou points quantiques. Le confinement modifie considérablement l'organisation et le comportement du gaz d'électrons et donc ses propriétés physiques, telles la conductivité électrique ou l'absorption optique, ce qui permet de construire des dispositifs électroniques ou optoélectroniques " taillés " sur mesure pour différentes applications technologiques.

NATURALISME

Doctrine selon laquelle rien n'échappe aux explications données par les sciences de la nature, ce qui revient à supposer que la nature constitue la totalité de la réalité. La réalité est unique et est soumise à la méthode scientifique pour son étude. C'est un réductionnisme* physicaliste* qui comporte une vision scientifique du monde*. Le naturalisme conteste les prétentions de la philosophie à constituer une méthode indépendante de connaissance et cherche à ramener toutes les problématiques philosophiques à des problématiques scientifiques. Selon les naturalistes il n'y a pas de formes platoniciennes, de substances mentales cartésiennes ou de noumène* kantien, ou tout autre agent, pouvoir ou entité qui n'appartienne pas à la nature. La nature est l'ensemble des choses qui nous sont accessibles par l'observation et les méthodes des sciences empiriques.

Le naturalisme fait reposer la connaissance et la science sur une certaine nature du sujet connaissant empiriquement accessible. En dernier ressort les fondements des sciences se trouvent dans la psychologie ou dans la biologie (instinct de conservation ou principe de l'économie de la pensée selon Mach*). C'est la nature de ce qui connaît qui rend compte de ce qui est connu.

De très nombreux débats ont lieu aujourd'hui pour savoir dans quelle mesure l'épistémologie peut être naturalisée. Avons-nous besoin d'une théorie philosophique pour comprendre la connaissance ? Celle-ci ne relève-t-elle pas seulement des méthodes empiriques de la science (psychologie, linguistique, neuroscience, science cognitive) ? Ne faut-il pas remplacer l'épistémologie traditionnelle par l'étude psychologique de notre façon de raisonner, comme le prétend Quine* ? Ce n'est pas exactement le même débat qu'entre rationalisme* et empirisme*,

quoiqu'il y soit lié. Le naturalisme s'oppose au formalisme* et de ce point de vue le fondateur de la logique, Frege*, et le philosophe Husserl*, influencé par Hilbert*, sont des anti-naturalistes.

La philosophie de l'esprit est un autre domaine où le naturalisme est particulièrement actif et très controversé récemment. Nombreux sont ceux qui pensent que les catégories, les concepts et le vocabulaire nécessaires pour expliquer la conscience*, la pensée* et le langage* sont ceux des sciences naturelles et éventuellement des sciences sociales envisagées de manière naturaliste. L'esprit est une part intégrante de la nature.

Le naturalisme pose la question de savoir ce qu'est la science et de définir une méthode unique d'acquisition des connaissances.

Le naturalisme s'accorde pour considérer que seules des causes physiques peuvent avoir des effets physiques. Il résiste à toutes les tentations de considérer des effets supranaturels offertes par les étrangetés de la mécanique quantique ou les mystères du fonctionnement de l'esprit.

NATURE

La nature est l'ensemble du monde réel, le monde physique, dans la variété de ses formes, en fait l'univers matériel constituant l'environnement de l'homme et le cadre des modifications apportées par l'homme, qualifiées d'artificielles*. Selon les mots de Descartes* dans le *Traité du monde* : " sachez donc, premièrement, que par la nature je n'entends point ici quelque déesse ou quelque autre sorte de puissance imaginaire, mais je me sers de ce mot pour signifier la matière

Mais la séparation de l'homme et de la nature selon divers critères, comme le déterminisme*, le libre arbitre* ou l'intentionnalité*, en tant que séparation du sujet* de son contexte* n'est pas toujours opérante et se trouve battue en brèche par l'écologie* moderne. La notion de nature porte donc en elle des questions philosophiques, à travers les rapports que l'homme entretient avec le milieu naturel et l'environnement, ses conceptions de la vie sociale, et les multiples sens qu'il est possible d'attribuer au mot nature dans les représentations sociales. On oppose souvent la nature à la culture*. Tous les grands courants de la philosophie ont cherché à répondre à la question de savoir ce qu'est la nature et comment les représentations qu'en font les êtres humains correspondent à sa réalité. Le rationalisme*, l'idéalisme*, l'empirisme*, le matérialisme* sont autant de réponses à cette question fondamentale.

Deux grandes traditions philosophiques se partagent les opinions sur les constituants de la nature. Une tradition de la substance, à l'origine chez Aristote* et développée chez les rationalistes Descartes*, Leibniz* et Spinoza*, puis reprise dans le matérialisme* de la science moderne. Une tradition du processus* ou de la relation* qui s'affirme à la fin du XIX^e siècle, et qui prétend que nous ne connaissons pas les objets mais leurs relations. Une tradition qui s'épanouira dans le structuralisme*.

Les conceptions sur la nature évoluent au fil des systèmes philosophiques et des connaissances scientifiques donnant naissance à la philosophie naturelle*. De la nature comme création divine à la nature comme hiérarchie de constituants matériels, il y a toujours eu cependant un sentiment de l'unité du cosmos. Au point même de penser parfois la nature comme un seul être et de la personnifier. Avec depuis le darwinisme* une vision évolutive de toute chose.

L'inventaire des constituants de la nature n'est pas terminé tant du côté microscopique (particules élémentaires, composants biochimiques) que du côté cosmique (matière noire*). Les processus de création tout comme les processus d'évolution sont encore insuffisamment précisés.

L'organisation et l'évolution de la nature sont soumises à des lois, les lois de la nature*.

Simon Diner

« Depuis la nuit des temps l'homme n'a cessé de modifier sa vision de la Nature. Les historiens des sciences s'accordent à dire que, malgré les apparences, il n'y a pas une seule et même Nature à travers les temps. Que peut-il y avoir en commun entre la Nature de l'homme dit "primitif", la Nature des grecs, la Nature de l'époque de Galilée, du Marquis de Sade, de Laplace ou de Novalis ? Rien, en dehors de l'homme lui-même. La vision de la Nature à une époque donnée dépend de l'imaginaire prédominant à cette époque qui, à son tour, dépend d'une multitude de paramètres : le degré de développement des sciences et des techniques, l'organisation sociale, l'art, la religion, etc. Une fois formée, l'image de la Nature agit sur tous les domaines de la connaissance. Le passage d'une vision à une autre n'est pas progressif, continu - il s'opère plutôt par des ruptures brusques, radicales, discontinues. Plusieurs visions contradictoires peuvent même coexister. L'extraordinaire diversité des visions de la Nature explique pourquoi on ne

peut pas parler de la Nature, mais seulement d'une certaine nature en accord avec l'imaginaire de l'époque considérée.

Il est important de souligner que la relation privilégiée, sinon exclusive, entre la Nature et la science n'est qu'un préjugé récent, fondé sur l'idéologie scientiste du 19^e siècle. La réalité historique est beaucoup plus complexe. L'image de la Nature a toujours eu une action multiforme : elle a influencé non seulement la science mais aussi l'art, la religion, la vie sociale. Ce fait pourrait expliquer bien des synchronicités étranges. Je me borne à donner un seul exemple : l'apparition simultanée, à la fin de ce siècle, de la théorie de la fin de l'Histoire et des théories d'unification en physique des particules. Les théories d'unification en physique ont l'ambition d'élaborer une approche complète, fondée sur une interaction unique et qui pourra tout prédire (d'où le nom de "Théorie du Tout"). Il est bien évident que si une telle théorie voit le jour dans l'avenir, cela signifiera la fin de la physique fondamentale, car il n'y aura plus rien à chercher. Il est intéressant d'observer que les idées de fin de l'Histoire et de fin de la physique ont pu surgir simultanément de notre imaginaire "fin de siècle". Est-ce une simple coïncidence ?

Malgré la foisonnante et fascinante diversité des images de la Nature, on peut néanmoins distinguer trois grandes étapes : la Nature magique, la Nature-machine et la mort de la Nature.

Pour la pensée magique la Nature est un organisme vivant, doué d'intelligence et de conscience. Le postulat fondamental de la pensée magique est celui de l'interdépendance universelle : la Nature ne peut être conçue en dehors de ses relations avec l'homme. Tout est signe, trace, signature, symbole. La science, dans l'acception moderne de ce mot, est inutile.

A l'autre pôle, la pensée mécaniste du 18^e et surtout 19^e siècle (qui prédomine encore aujourd'hui) conçoit la Nature non pas comme un organisme mais comme une machine, qu'il suffit de démonter pièce par pièce pour la posséder entièrement. Le postulat fondamental de la pensée mécaniste est que la Nature peut être connue et conquise par la méthodologie scientifique, définie d'une manière complètement indépendante de l'homme et séparée de lui. La vision triomphaliste de "conquête de la Nature" plonge

ses racines dans la redoutable efficacité technologique de ce postulat.

L'aboutissement logique de la vision mécaniste est la mort de la Nature, la disparition du concept de Nature du champ scientifique. La Nature-machine, avec ou sans Dieu horloger, du début de la vision mécaniste se décompose en un ensemble de pièces détachées. Dès lors, nul besoin d'un Tout cohérent, d'un organisme vivant ou même d'une machine qui gardait, malgré tout, un relent finaliste. La Nature est morte. Reste la complexité. Une complexité inouïe qui envahit tous les domaines de la connaissance, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Mais cette complexité est perçue comme accidentelle, l'homme lui-même étant considéré comme un accident de la complexité. Vision sinistre, qui nous ramène à notre propre monde tel que nous le vivons aujourd'hui.

La mort de la Nature est incompatible avec l'interprétation cohérente des résultats de la science contemporaine, malgré la persistance de l'attitude néo-réductionniste qui accorde une importance exclusive aux briques fondamentales de la matière et aux quatre interactions physiques connues.

L'objectivité stricte de la pensée classique n'est plus valable dans le monde quantique. Une séparation totale entre l'observateur et une Réalité complètement indépendante de cet observateur conduit à des paradoxes insurmontables (Cf. Observateur en mécanique quantique). Une notion plus fine d'objectivité caractérise le monde quantique. L'"objectivité" dépend du niveau de Réalité considéré.*

Le vide vide de la physique classique est remplacé par le vide plein de la physique quantique. La plus petite région de l'espace est animée par une extraordinaire activité, signe d'un perpétuel mouvement. Les fluctuations quantiques du vide déterminent l'apparition soudaine de paires particules - antiparticules virtuelles qui s'annihilent réciproquement dans des intervalles extrêmement courts de temps. Tout se passe comme si les quanta de matière sont créés à partir de rien. Un métaphysicien pourrait dire que le vide quantique est une manifestation d'un des visages de Dieu : Dieu le Rien. En tout cas, dans le vide quantique, tout est vibration, une fluctuation entre l'être et le non-être.*

Le vide quantique est plein, plein de toutes les potentialités, de la particule à l'univers. En fournissant de l'énergie au vide quantique nous pouvons l'aider à matérialiser ses potentialités. C'est exactement ce que nous faisons en construisant les accélérateurs de particules.*

L'espace-temps lui-même n'est plus un concept immuable. Notre espace-temps continu à quatre dimensions n'est pas l'unique espace-temps concevable. Dans certaines théories physiques, il apparaît plutôt comme une approximation, comme une "section" d'un espace-temps beaucoup plus riche en tant que générateur de phénomènes possibles. Les dimensions supplémentaires ne sont pas le résultat d'une simple spéculation intellectuelle. D'une part, ces dimensions sont nécessaires pour assurer l'autoconsistance de la théorie et l'élimination de certains aspects indésirables. D'autre part, elles n'ont pas un caractère purement formel - elles ont des conséquences physiques à notre propre échelle.

Le degré de matérialité quantique est, certes, différent du degré de matérialité considéré par la physique classique. Le concept-clé dans la compréhension de la matérialité de l'univers est celui de niveaux de Réalité.

La notion même de lois de la Nature change complètement son contenu par rapport à la vision classique. La hiérarchie des lois a évolué en même temps que l'Univers lui-même. Autrement dit, nous assistons à la naissance des lois au fur et à mesure de l'évolution de l'Univers. Ces lois préexistent au "début" de l'Univers en tant que potentialités. C'est l'évolution de l'Univers qui actualise ces lois et leur hiérarchie.

Le modèle transdisciplinaire de la Nature, qui intègre toutes ces

caractéristiques nouvelles de l'univers physique, distingue trois aspects majeurs de la Nature :

1) La Nature objective, soumise à une objectivité subjective. Cette objectivité est subjective dans la mesure où les niveaux de Réalité sont reliés

aux niveaux de perception. L'accent est néanmoins mis sur l'objectivité, dans la mesure où la méthodologie est celle de la science.

2) *La Nature subjective, soumise à une subjectivité objective. Cette subjectivité est objective dans la mesure où les niveaux de perception sont reliés aux niveaux de Réalité. L'accent est néanmoins mis sur la subjectivité, dans la mesure où la méthodologie est celle de la science ancienne de l'être, qui traverse toutes les traditions et les religions du monde.*

3) *La trans-Nature, qui assure l'unité entre la Nature objective et la Nature subjective. La trans-Nature concerne le domaine du sacré.*

Nous pouvons ainsi parler de la double nature de la Nature : une nature naturelle, qui regroupe la Nature objective et la Nature subjective, est une nature trans-naturelle, désignée par l'expression « trans-Nature ». Il y a une double nature de la Nature, comme il y a une double nature de l'être humain.

La Nature transdisciplinaire a une structure ternaire (Nature objective, Nature subjective, trans-Nature), qui définit la Nature vivante. Cette Nature est vivante car la vie y est présente dans tous ses degrés et son étude demande l'intégration d'une expérience vécue. Les trois aspects de la Nature doivent être considérés simultanément, dans leur inter-relation et leur conjonction dans tout phénomène de la Nature vivante. L'étude de la Nature vivante réclame une nouvelle méthodologie - la méthodologie transdisciplinaire - qui est différente et de la méthodologie de la science moderne et de la méthodologie de la science ancienne de l'être.

Une tâche prioritaire de la transdisciplinarité est l'élaboration d'une nouvelle Philosophie de la Nature, médiateur privilégié du dialogue entre tous les domaines de la connaissance.

La définition de la Nature que je propose ne signifie ni un retour à la pensée magique, ni un retour à la pensée mécaniste, car elle repose sur la double affirmation : 1) l'être humain peut étudier la Nature par la science ; 2) la Nature ne peut pas être conçue en dehors de sa relation à l'être humain.

A vrai dire "Nature vivante" est un pléonasma, car le mot "Nature" est intimement lié à celui de "naissance".

Le mot latin de natura a comme racine nasci (naître) et désigne l'action de faire naître ainsi que les organes féminins de la génération. La Nature vivante est la matrice de l'autonaissance de l'homme.

Galilée a eu la vision de la Nature comme un texte en langage mathématique qu'il suffisait de déchiffrer et lire. Cette vision, qui a traversé les siècles, s'est avérée être d'une redoutable efficacité. Mais nous savons aujourd'hui que la situation est beaucoup plus complexe. La Nature nous apparaît plutôt comme un pré-texte : le livre de la Nature est donc non pas à lire, mais à écrire. »

Basarab Nicolescu

NATURE ET ESSENCE

NATURE HUMAINE

NATUREL

NATURPHILOSOPHIE

Le mouvement philosophico-scientifique de la Naturphilosophie est un mouvement important de la culture allemande, lié au romantisme de la fin du XVIII^e siècle et à l'idéalisme allemand*. Contre la nature-objet de Galilée*, Descartes* et Newton* il proclame la nature sujet, dans une démarche incluant l'esprit à la nature. La pensée théosophique* a trouvé des échos, et parfois bien davantage, chez les adeptes de la Naturphilosophie

La Naturphilosophie ne commence véritablement à exister comme mouvement intellectuel identifiable qu'au milieu des années 1790, avec Schelling* et C. A. Eschenmayer. Ce programme de recherche perd de son dynamisme dès la fin des années 1820. Entre ces deux dates, plusieurs philosophes majeurs (Schelling*, Hegel*, Novalis, F. Schlegel*, Goethe*, Fries, mais il faudrait également ajouter ceux qu'ils influencèrent : Schopenhauer, Humboldt, Engels*...) et plusieurs scientifiques importants (Oersted, Davy...), ont consacré une partie de leur activité théorique à la *Naturphilosophie*. La *Naturphilosophie* présente des formes si variées que l'on pourrait parler, au pluriel, de *Naturphilosophies*, qui doivent être interrogées suivant les modalités de

la combinaison des rationalités philosophique et scientifique. Elles peuvent également l'être suivant leur orientation philosophique générale : il convient à ce propos de distinguer les *Naturphilosophies* romantiques (Novalis), théosophiques (Baader), empirique (Goethe), transcendantales (Frier, Link), métaphysiques (la physique spéculative de Schelling, Schopenhauer) et dialectiques (Hegel). Le modèle schellingien fut retrouvé chez des auteurs qui en semblent assez éloignés (par exemple chez Engels, qui dans sa *Dialectique de la nature* est plus proche de Schelling et plus éloigné de Hegel qu'il le croit). Un certain renouveau de la *Naturphilosophie* (Thom*, Prigogine* et Stengers) se rapproche parfois de Schelling, et l'organicisme schellingien peut fournir une caution philosophique à certains discours écologiques.

Le projet hégélien, souvent confondu avec le projet schellingien. La *Naturphilosophie* hégélienne se présente comme un type de fondation original des sciences de la nature plutôt que comme une recreation de la nature par la pensée. Comme les *Naturphilosophies* transcendantales, elle refuse de considérer une autre nature que celle qui se donne dans la phénoménalité et qui est étudiée par les sciences positives. Elle en propose une fondation originale, tributaire du réalisme de la physique spéculative, qui consiste à faire apparaître les principes des sciences particulières comme les différents moments de l'être total de la nature. C'est la dialectique qui permettra d'intégrer le savoir positif dans le discours spéculatif tout en conservant et en en déduisant la vérité.

NEANT

Le non être.

« *Le néant ou son fils le vide, ne peut exister qu' à condition de n'exister point et que rien n'ait jamais existé ; car dès que quelque chose existe ou a existé, tout, nécessairement, existe de toute éternité et le néant n'a jamais été concevable. Si le néant était quelque part, il serait partout. Où voulez vous qu'il se trouve ou se cache, ce malheureux néant ? Et quand voulez vous qu'il soit ? Il ne peut profiter de l'espace et du temps. Il ne peut s'y installer, ni s'en revêtir. Dès qu'il chercherait à les utiliser, il deviendrait ce qu'il utiliserait. S'il était possible, s'il avait jamais été possible, nous n'existerions point. Pouvoir penser qu'il existe prouve qu'il n'existe pas. Nous ne pouvons en parler sans lui donner une existence qu'il n'eut jamais, c'est-à-dire sans l'anéantir* ».

Maurice Maeterlinck, prix Nobel de littérature, dans un ouvrage de vulgarisation scientifique paru en 1933, *La grande loi*, exprime bien que l'absolu du néant porte atteinte à son existence même.

A ce néant néantisé Heidegger*, oppose dans « *Qu'est ce que la métaphysique ?* » (1929) un néant lié à l'être*.

« Le Néant n'est ni un objet, ni en général un existant. Le Néant ne survient ni « pour soi », ni à côté de l'existant auquel, pour ainsi dire il adhère. Le Néant est la condition qui rend possible la révélation de l'existant comme tel pour la réalité humaine. Le Néant ne forme pas simplement le concept antithétique de l'existant, mais l'essence de l'Etre même comporte dès l'origine le Néant. C'est dans l'être de l'existant que se produit le néantir du Néant ».

Le néant adhère à l'existence, tout comme le vide quantique* adhère à la matière ou à la lumière. C'est l'autre côté de l'être, et non pas sa négation*. Le néant et l'être ne sont pas deux concepts métaphysiques* opposés, tout comme le vide et la matière ne sont pas deux manifestations séparées de la nature. Ce sont deux aspects d'une même réalité, deux Etats de la nature, deux faces d'une dualité* fondamentale. L'être comporte dès l'origine le néant, comme la matière comporte en son sein le vide qui participe à son existence.

NEGATION

NEODARWINISME

Théorie synthétique de l'évolution, car elle fait la synthèse entre le phénomène d'évolution des espèces et les mécanismes génétiques.

NEODETERMINISME (Cf. NEOMECHANISME*)

NEO-KANTISME

Mouvement idéaliste* de la seconde moitié du XIX^e siècle en Allemagne se réclamant de la devise du retour à Kant*. Ce mouvement développe les éléments idéalistes et métaphysiques de la philosophie de Kant. « La chose en soi » est tantôt rejetée tantôt considérée comme un concept limite ou une construction à priori de la sensibilité. Ce mouvement s'exprime dans deux écoles : l'école de Marburg (Cohen, Natorp, Cassirer*), et l'école de Baden (Windelbandt, Rickert). L'œuvre de Cassirer éclaire le rôle du symbolisme* dans la connaissance scientifique. Le fictionnalisme* de H. Vaihinger*, « la philosophie du comme si », s'inscrit totalement dans la tradition kantienne, dont Vaihinger était un grand spécialiste.

NEOMECHANICISME (NEODETERMINISME)

Au mécanicisme* associé à la mécanique classique* succède de nos jours un néomécanicisme associé à la théorie des systèmes dynamiques*. Il est le pilier d'une culture non-linéaire* où le réductionnisme* du mécanicisme* se voit remplacé par le non réductionnisme de l'émergentisme*. Son paradigme central est le système ouvert* non linéaire* siège de l'auto-organisation*. C'est un néodéterminisme qui au lieu de ne s'intéresser qu'aux systèmes fermés* sur lequel agissent des forces* envisage l'évolution interne de systèmes ouverts. A l'évolution selon l'action d'un agent extérieur il préfère l'évolution propre d'un système complexe* ouvert* avec émergence* d'une structure par autoorganisation*. Ses concepts opératoires sont les attracteurs*, les cycles limites* et les bifurcations*. Ses phénomènes fétiches sont la complexité*, l'autoorganisation* et le chaos* déterministe. Notez bien l'apparition au sein de la mécanique classique de tous ces nouveaux concepts et de ce nouveau vocabulaire, lié au changement de système étudié.

L'abandon d'une attitude réductionniste simpliste correspond à une considération privilégiée du qualitatif, du global, du géométrique au dépens du quantitatif, du local et de l'analytique. Ceci s'accompagne d'une prise en compte systématique des niveaux d'observation et des échelles, et aboutit à des efforts systématiques pour définir correctement et judicieusement la complexité*, l'information* et le sens*. Ce néomécanicisme entraîne un changement total de point de vue responsable d'une approche ontologique réaliste des problèmes liés au hasard* et un renouvellement des questions concernant l'apparition de l'ordre, de l'organisation* et des formes*.

Le néomécanicisme transforme complètement les concepticiens sur le déterminisme*, l'évolution*, la causalité*, la finalité*, la régulation*, l'apprentissage*, la rationalité*. Toute une culture non-linéaire* où s'ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension de l'apparition et du maintien de la vie*, de l'évolution biologique*, ainsi que pour l'étude des phénomènes de perception*, de pensée* et de conscience*.

Le développement du néomécanicisme s'inscrit dans les cadres technologiques de la société contemporaine.

La première révolution industrielle est fondée sur un développement sans précédent des potentiels énergétiques (machine à vapeur, moteur électrique, moteur à explosion) et l'on doit considérer comme naturel le rôle dominant des concepts de force* et d'énergie*

dans la physique des siècles passés, admirablement exprimé par l'édifice de la mécanique classique.

La seconde révolution industrielle est fondée sur d'ahurissantes possibilités de transmission, de stockage et de traitement des signaux et de l'information qu'ils véhiculent, grâce à la radioélectricité* et aux moyens informatiques de calcul et de traitement du signal*. Il en découle une profonde modification des mentalités scientifiques, qui se tournent vers les concepts d'organisation* et de complexité*, de contrôle* voire d'intelligence artificielle*.

A la mise en évidence et au recensement des forces et des facteurs d'évolution succède maintenant un intérêt pour l'évolution elle-même. A une simplicité des forces s'oppose une complexité des mouvements et des évolutions. Il se produit une « redécouverte du temps* ».

Parti des sciences physiques, irradiant la biologie, ce mouvement de pensée se dessine en économie, en sociologie et en histoire. Les problèmes qui se posent sont non pas tant ceux des forces sociales ou politiques, ceux des forces productives ou créatrices, que ceux des configurations évolutives complexes créés par des forces reconnues et relativement simples. Ce qui distingue les options politiques n'est pas tant dans le privilège donné à telle action ou à telle classe sociale que dans le choix de la dynamique de tel ou tel modèle de développement de la société.

Différentes dénominations recouvrent le néo-mécanicisme, dont « culture non linéaire* » et « synergétique* »

NEOPLATONISME

Courant philosophique et mystique de la pensée antique du III^e au VI^e siècles, unissant des doctrines orientales à la pensée grecque. Une synthèse des idées de Platon*, de la logique et des enseignements d'Aristote ne contredisant pas Platon, du pythagorisme et de l'orphisme, des idées des oracles chaldéens et de la religion égyptienne. Les racines de certaines idées, comme l'émanation de l'esprit dans la matière et son retour pour se fondre en Dieu, remontent même à la philosophie hindouiste. Entreprise pour sauver la pensée grecque face à la montée du christianisme.

Le néo-platonisme réunit des philosophes vivant au pourtour de la méditerranée : Ammonius Saccas (Alexandrie), Plotin*, Porphyre (Rome), Jamblique (Syrie), Proclus*, Pseudo-Denis l'Aéropagite* (Athènes).

La philosophie néoplatonicienne a pour but la résolution d'un des problèmes au cœur de la pensée grecque antique, à savoir le problème de l'Un et du multiple*. Plus particulièrement, il s'agit de comprendre comment articuler l'Un au Multiple. Nous constatons le Multiple dans la nature, or l'Un est le fondement de l'intelligibilité. Cette philosophie est rattachée au platonisme de par sa volonté de résoudre les apories de la pensée de Platon, et en particulier celles d'un des dialogues les plus difficiles : le *Parménide*, où Platon envisage trois hypothèses principales sur l'Un (l'Un absolu inconnaissable et ineffable qui exclut tout multiple ; l'Un qui est être et admet donc tous les contraires ; l'Un qui est et qui n'est pas, et qui donc est changement, instant).

Plotin* est le philosophe le plus connu et le plus représentatif du néoplatonisme. Quatre idées principales se dégagent :

La dialectique platonicienne de la triade l'Un- l'intelligence- l'esprit

L'éloignement par degrés transitoires de « l'un et du général » à la matière

La connaissance mystico-intuitive de l'en Haut.

La libération de l'esprit de l'homme de la condition matérielle, pour atteindre une spiritualité pure, par l'ascèse ou l'extase.

Le néoplatonisme est une doctrine sur la structure hiérarchique du monde engendrée à partir de fondements situés au-delà des limites ; une doctrine du retour de l'esprit à sa source, une théurgie, soit des moyens pratique pour l'union avec la Divinité.

Le néoplatonisme a eu une influence considérable et une descendance nombreuse. On peut citer le néoplatonisme gnostique, les néoplatonismes islamiques, juifs et perses, le néoplatonisme kabbalistique*, le néoplatonisme de la Renaissance.

NEOPOSITIVISME

NEURONE

NEURONE MIROIR

NEUROSCIENCES

Les neurosciences sont constituées par un ensemble de disciplines voisines qui se consacrent toutes à la connaissance et à la

compréhension de la structure et du fonctionnement de ce qui est à présent l'objet physique réputé le plus complexe de l'univers : le cerveau* ou le système nerveux humain. Pour donner un ordre de grandeur de cette complexité, on peut citer l'estimation du nombre de neurones* et de connexions synaptiques entre ces neurones dans un cerveau humain. On évalue à une centaine de milliards le nombre des neurones qui sont les unités cellulaires de base dont se compose un cerveau humain. On évalue à environ un million de milliards les connexions synaptiques entre la centaine de milliards de neurones.

Les neurosciences moléculaires et cellulaires sont les niveaux d'analyse les plus élémentaires du système nerveux central soit un ensemble de disciplines dont la biologie moléculaire*, l'histologie, la neuroanatomie et la neurophysiologie. Les méthodes de la biologie moléculaire ont permis de découvrir les constituants chimiques des neurones* et les lois qui gouvernent la communication entre les neurones. Elles permettent notamment d'étudier la libération et la réception des neurotransmetteurs et le rôle des canaux ioniques dans la traversée des protéines et des ions à travers la membrane cellulaire. Grâce à elles, on connaît, par exemple, les mécanismes moléculaires de l'apprentissage et de la mémorisation chez une limace de mer nommée *aplysia*. Pour étudier un niveau plus complexe d'organisation du système nerveux, aux méthodes neurobiologiques s'ajoutent les méthodes de la neuroanatomie, de l'histologie et de la neurophysiologie qui ont permis d'établir des cartes de l'organisation des différentes aires du cerveau humain et d'analyser les voies de communication entre les aires cérébrales qui s'envoient les unes aux autres des projections tantôt réciproques tantôt non réciproques.

Les approches évolutionnistes et développementales en neurosciences considèrent un cerveau humain (et tout cerveau) comme le résultat d'un double processus historique de formation : un processus d'évolution phylogénétique des espèces qui ont précédé l'apparition d'*homo sapiens* et un processus ontogénétique de développement de chaque individu. Le premier processus donne lieu à l'étude des différences et des similitudes entre les caractéristiques du cerveau humain et celles du cerveau d'espèces — dont les primates non humains — qui ont eu avec l'espèce humaine des ancêtres communs. Le second processus donne lieu à l'étude des bases génétiques, de l'embryogénèse, du développement épigénétique post-natal et de la plasticité du système nerveux des membres de l'espèce humaine et d'autres espèces.

Les neurosciences cognitives* recherchent de corrélations entre des aires cérébrales et des fonctions cognitives et jouent un rôle moteur

pour les neurosciences intégratives ou cognitives qui reposent sur un ensemble hétéroclite de techniques expérimentales.

NEUROSCIENCES COGNITIVES

Les neurosciences cognitives étudient les mécanismes neurobiologiques qui sous-tendent la cognition (perception, motricité, langage, mémoire, raisonnement, émotions...) C'est une branche des sciences cognitives* qui fait appel pour une large part aux neurosciences*, à la neuropsychologie, à la psychologie cognitive, à l'imagerie cérébrale ainsi qu'à la modélisation proposée par les neurosciences théoriques*. C'est une biologie de l'esprit.

Une des approches de la cognition utilise le modèle des réseaux neuronaux*. Ce modèle fait trois hypothèses pour représenter l'esprit*.

L'esprit est considéré comme un réseau d'unités cognitives ou nœuds. Ces nœuds représentent les neurones mais sont moins compliqués que ceux-ci. Un nœud possède un certain niveau d'activation.

Il existe des figures de connexion entre les nœuds. Ceci permet à l'activation ou à l'inhibition de passer d'un nœud à l'autre.

Les nœuds sont organisés en structures ou en modules. Les nœuds d'un module sont consacrés à un processus spécifique Les nœuds d'un module de perception sont impliqués dans la gestion de l'information perceptive. Les nœuds des modules sont organisés en couches. Les liaisons entre les nœuds à l'intérieur d'une même couche sont inhibitoires, alors que les liaisons entre couches sont excitatoires.

NEUROSCIENCES THEORIQUES

Les neurosciences théoriques sont les méthodes mathématiques et les modélisations utilisées dans les neurosciences*. Elles sont dominées aujourd'hui par le recours à la théorie des systèmes dynamiques* et sont une des manifestations importantes de la culture non linéaire*.

Le spectre des neurosciences théoriques est extrêmement large et va de l'électrophysiologie et de l'étude des réseaux de neurones*, à l'étude des modèles du cerveau* et de la conscience*. Les outils théoriques utilisés sont les oscillateurs* et leur synchronisation*, l'autoorganisation* et la création de formes*, les attracteurs* et les états transitoires*, les bifurcations* et les transitions de phase*.

NEUTRINO

Particule élémentaire non chargée électriquement, de masse au repos extrêmement faible, de moment magnétique nul et de spin $\frac{1}{2}$ (fermion*). C'est un lepton*, ne participant donc pas à l'interaction forte* et ayant une énorme capacité de pénétration dans la matière*.

Il existe différents types de neutrino correspondant aux trois leptons chargés : le neutrino électronique correspondant à l'électron*, le neutrino muonique correspondant au muon*, un neutrino correspondant au lepton τ . Chaque lepton chargé prend part aux interactions faibles* en même temps que son neutrino (ex. $n \rightarrow p + e + \nu_e$ *)

NEUTRON

NIHILISME

Le nihilisme tire son nom du mot latin pour rien. C'est une forme extrême d'existentialisme* et de pessimisme qui affirme que la vie n'a pas de sens et que même si vous essayez de réaliser vos valeurs, à la fin votre vie se réduit à rien. Le nihilisme est pire que le fatalisme* car il ne réduit pas la vie à rien mais la considère équivalente à la souffrance..Nietzsche défendait une sorte de nihilisme.

NIVEAU DE REALITE

NOETIQUE

NOETHER (THEOREME DE) (Cf. Structures algébriques* de la physique*)

Le théorème de Noether (1918), s'inscrit dans l'esprit du programme d'Erlangen*. Il envisage le problème des invariants des problèmes variationnels* en se fondant sur la conjonction de méthodes du calcul variationnel* avec les méthodes des groupes de Lie*.

Ce théorème dit qu'à toute transformation continue de coordonnées*, rendant nulle la variation de l'action*, correspond un certain invariant, c.a.d. la conservation d'une fonction de ces coordonnées. Traduit en langage de physicien ceci veut dire que pour tout groupe de symétrie* (qui conserve nécessairement l'action*) il existe une loi de conservation d'une quantité physique. Théorème admirable par son universalité, contribution essentielle à l'unité de la physique*.

A la symétrie* par rapport au changement de l'origine des coordonnées spatiales, exprimant l'homogénéité de l'espace, correspond la loi de conservation de la quantité de mouvement. Le recul du canon ou la réaction d'un réacteur d'avion.

L'invariance par rapport au déplacement de l'origine des temps, qui exprime l'homogénéité du temps, correspond à la loi de la conservation de l'énergie.

A la symétrie* par rapport à la rotation dans l'espace, exprimant l'isotropie de l'espace*, correspond la loi de conservation du moment de la quantité de mouvement. La rotation du patineur sur glace.

En théorie de la relativité restreinte* qui exprime les propriétés de la rotation de l'espace temps quadridimensionnel, qui laisse invariante les équation du mouvement et qui contient la transformation de Lorentz*, on obtient le principe généralisé de la conservation du mouvement du centre de gravité.

A la symétrie miroir (inversion), qui s'exprime par le changement de signe de toutes les coordonnées et le renversement du temps, ne correspond aucune loi de conservation en physique classique, contrairement à ce qui se passe en théorie quantique (Cf. Conservation en mécanique quantique*).

En mécanique quantique aux transformations de l'espace temps viennent s'ajouter les transformations de l'espace interne*. La mécanique quantique elle même peut être considérée comme la mathématique des transformations de jauge* dont les générateurs correspondent aux différentes observables physiques. Par généralisation du théorème de Noether*, l'invariance de jauge globale (c'est à dire ne dépendant pas des points de l'espace temps) conduit à la conservation de la charge électrique, et les champs électriques et magnétiques peuvent être introduits pour préserver l'invariance de jauge locale.

L'apparition des nombres quantiques* est liée à l'existence de propriétés de symétrie du système (Wigner* 1927), c.à.d. aux représentations irréductibles des groupes* de symétrie, et donc d'après le théorème de Noether*, à la présence de quantités physiques conservées.

Il n'y a pas d'une manière générale de théorème de Noether inverse, selon lequel, à toute loi de conservation correspondrait un groupe de transformations laissant l'action* invariante. Seuls certains cas particuliers échappent à cette règle. Il y'a en général plus de lois de conservation que de lois de symétrie. On peut considérer ce fait comme signifiant que ce sont les propriétés de symétrie, en particulier celles concernant l'espace et le temps, qui sont à la base des lois de conservation, et non le contraire, comme on pourrait s'y attendre d'un point de vue philosophique exprimant que l'espace et le temps ne sont que des formes d'existence de la matière, et que les lois de

conservation, qui expriment la substantialité et la permanence de la matière, ne sont déterminées que par les mouvements des objets matériels.

NOM

Catégorie linguistique de désignation d'objet ou de concept. La problématique du nom est le rapport qu'il entretient avec ce qu'il représente. Connaître c'est nommer.

Dans la Bible, Adam crée le monde avec Dieu en donnant des noms aux animaux

De nombreux penseurs se sont interrogés sur le nom.

Il est au centre de la querelle entre nominalisme* et réalisme*

Dans le *Cratyle*, le Socrate de Platon* se pose la question : « *Si, parmi toutes les créatures existantes, je vais appeler cheval ce qui est homme, et au contraire, homme ce qui est cheval, alors, pour tous, homme continuera à être le nom de l'homme, et c'est seulement pour moi qu'il sera un cheval, et inversement le cheval-un homme* ».

En parfait réaliste* Platon considère la dénomination comme « *la reproduction consciente de l'essence, lorsque le nom est la chose qui se déclare elle-même à l'esprit humain* ». Il pense qu'il y'a une justesse des noms, propre à chaque chose naturelle. Les idées* en tant qu'essence des choses, apparaissent dans l'esprit humain grâce à la dénomination.

A.F. Losev*, adopte une position platonicienne sur le nom. Son étude du *nom*, qu'il a développé dans le cadre de la *Glorification du nom* a une grande valeur. En étudiant le nom, Losev passe par l'histoire de l'hésychasme*, les discussions sur l'idolâtrie au VII s., l'iconoclasme*, l'étude de Grégoire de Palamas et d'autres. Dans son célèbre ouvrage *La Philosophie du nom*, écrit en 1923, il développe une étude sur l'essence de Dieu, son nom et ses énergies. Losev comprend le *nom* non pas seulement comme un simple ensemble de sons, mais comme il a été conçu à l'époque du néoplatonisme* aréopagite chrétien au VIe s. Selon Losev, le nom exprime toujours l'essence d'une chose et en est inséparable. Le monde est créé par le nom et les mots*

On peut se demander ce qui détermine l'attribution d'un nom à une chose. René Thom* rattache cela à la stabilité structurelle*. *Les formes* subjectivement identifiables, les formes pourvues d'une dénomination, représentées dans le langage par un substantif, sont*

nécessairement des formes structurellement stables. Pour avoir un nom un objet doit être reconnaissable malgré ses déformations.

NOMBRE

Il n'y a pas de mathématique sans nombre. C'est un des éléments les plus importants de la connaissance (« Lire et compter »). L'histoire du nombre s'inscrit dans celle de l'écriture. Dénombrer est une des opérations les plus connues dans le monde antique. On peut dire que l'histoire de la mathématique est comme une histoire de l'extension de la notion de nombre au fur et à mesure des besoins.

On a même attribué au nombre une valeur ontologique, mythique ou mystique. Pythagore* considère le nombre comme une substance*, substrat stable et infini de l'univers matériel. Aristote*, pensant à Platon*, dit que les nombres se distinguent du sensible, en ce qu'ils sont éternels et invariants, et de l'idée*, en ce qu'ils supposent non seulement l'unité, mais aussi la pluralité. Losev*, grand historien de la philosophie antique, se présente comme un philosophe du nom*, du nombre et du mythe*.

Il y'a une histoire de l'écriture du nombre. Un des grands progrès a été la notation positionnelle indienne, permettant de représenter tout nombre avec dix chiffres (zéro compris). C'est aujourd'hui la notation universelle. Mais l'arrivée des ordinateurs introduit l'usage d'une notation binaire faite de 0 et de 1. C'est un système de notation positionnelle de base 2 où un nombre est représenté comme l'ensemble des coefficients d'une somme de puissances de deux.

L'ensemble des nombres est comme un jardin botanique. Il contient différentes catégories liées entre elles. Les nombres entiers* sont les plus naturels. Les nombres rationnels sont ceux qui s'expriment par des fractions rationnelles, rapport de deux nombres entiers (ex. $1/2$, $5/8$...). Les limites* des suites infinies de nombre rationnels permettent de définir les nombres réels*, en ajoutant aux nombres rationnels les nombres irrationnels (les nombres algébriques* comme racine carrée de 2 ou de 5, le nombre d'or*, et les nombres transcendants comme π , e, parmi l'immense banalité de la mer infinie des nombres irrationnels qui emplit l'univers des nombres). Les nombres réels permettent de numéroter tous les points d'une droite (la droite réelle ou la droite des réels). Ils constituent un infini* non dénombrable et illustrent le problème de la continuité*.

NOMBRE ALEATOIRE

NOMBRE ALGÈBRE

Un nombre algébrique, est tout nombre qui est solution d'une équation algébrique (autrement dit racine d'un polynôme non nul) à coefficients rationnels. Sans plus de précision, on suppose qu'un nombre algébrique est un nombre complexe*

Tout nombre rationnel est algébrique, car le quotient p/q de deux entiers est racine de l'équation $qx - p = 0$.

Un nombre irrationnel peut être ou non algébrique. Par exemple $\sqrt{2}$ ou $(\sqrt[3]{3})/2$ sont algébriques, car ils sont les solutions de $x^2 - 2 = 0$ et $8x^3 - 3 = 0$, respectivement.

Le nombre complexe i est algébrique car il est solution de $x^2+1=0$

NOMBRE CARDINAL (puissance d'un ensemble) (Cf. Théorie des ensembles*)

Propriété d'un ensemble commune à tous les ensembles dont les éléments sont en correspondance biunivoque avec ceux de l'ensemble considéré.

Ainsi en est-il de l'ensemble des nombres entiers et de l'ensemble de leurs carrés, de l'ensemble des nombres pairs et de l'ensemble des entiers, des ensembles de points de deux segments de droite inégaux, etc. Dans chacun de ces couples, les ensembles sont « équivalents », c'est-à-dire ont entre eux une relation d'équivalence (relation réflexive, symétrique et transitive).

Cantor commence par distinguer entre nombre cardinal et nombre ordinal. La première notion désigne l'opération de compter, indifférente à l'ordre dans lequel sont pris en compte les différents éléments, la deuxième celle de numéroter ou d'énumérer, qui établit un ordre entre les éléments. Ces deux notions sont confondues dans le fini. Quelle que soit, en effet, la façon d'énumérer les éléments d'une collection finie, le dernier élément énuméré, disons le n -ième, marque en même temps le nombre cardinal de la collection, soit n . Mais pour les collections infinies il n'en est pas de même

Cantor a défini le cardinal d'un ensemble comme ce qui reste quand on s'abstrait des qualités des objets et de leur ordre*. C'est la démarche initiale du structuralisme en mathématiques (structures algébriques*) qui marquera de son empreinte toute cette discipline au XXème siècle.

Pour un ensemble fini le nombre cardinal est le nombre d'éléments de l'ensemble. La démarche décisive de Cantor est d'attribuer un nombre aux ensembles infinis*, et de nommer ces nombres, aleph (la lettre hébraïque) zéro pour le cardinal des entiers naturels et aleph un pour le cardinal des nombres réels. Ceci ouvre la voie par « dénomination » à une conception numérique de l'infini qui aura un grand retentissement sur les mathématiques.

Cantor démontre ainsi un certain nombre de résultats non intuitifs. Toute les parties infinies de l'ensemble des nombres naturels conduit à définir un ensemble infini comme un ensemble dont la cardinalité est la même que celle d'au moins un de ses sous-ensembles. Les trois ensembles, nombres naturels, nombres rationnels, nombres algébriques, ont le même cardinal. Les nombres rationnels et les nombres algébriques sont dénombrables.

Pour les ensembles infinis, aleph zéro est le plus petit cardinal, et aleph un est le cardinal correspondant au continu. Y'a-t-il un cardinal entre les deux ? Cantor pense que non. C'est la fameuse hypothèse du continu, qui s'avèrera indécidable.

La puissance de l'ensemble de tous les sous ensembles d'un ensemble est plus grande que la puissance de cet ensemble. Il en découle la possibilité d'obtenir un ensemble de puissance plus grande que celle de tout ensemble donné, soit un ensemble de puissance aussi grande que l'on veut. Ainsi il existe des cardinaux supérieurs à alpha un, comme c'est le cas pour l'ensemble de toutes les fonctions réelles d'une variable réelle.

Avant Cantor on pensait que la droite contient moins de points que le plan. Il a montré qu'un carré unité ne contient pas plus de points qu'un segment unité. La cardinalité du plan est égale à la cardinalité du continuum sur la droite. Vertiges de l'infini.

NOMBRE COMPLEXE

Un nombre complexe est un ensemble de deux nombres réels. Autant dire un vecteur* joignant l'origine des coordonnées à un point du plan. Mais le nombre complexe est un objet algébrique (algèbre*), alors que le vecteur est un objet géométrique* régit par le calcul vectoriel*. Deux point de vue conceptuels pour une même réalité.

La puissance du formalisme mathématique s'exprime en donnant à ces concepts une concrétisation opératoire. Historiquement le nombre complexe est apparu dans une extension de la notion de nombre lors de la recherche des solutions des équations polynomiales

(ex. équation du second degré). On y a dégagé la notion de nombre imaginaire, racine carrée de -1 , « nombre » qui multiplié par lui-même vaut -1 . Ce nombre est noté i .

A un point du plan de coordonnées x et y on attache un nombre complexe noté $x + iy$. On peut aussi du point de vue géométrique définir ce point par la longueur du vecteur correspondant et l'angle α que fait ce vecteur avec l'axe des x . On note alors le nombre complexe comme produit d'une partie réelle (la longueur) par une partie imaginaire dépendant de i et de α .

On appelle nombre complexe conjugué le nombre complexe obtenu en remplaçant i par $-i$ dans un nombre complexe. Dans les théories physiques l'emploi d'un nombre complexe s'accompagne toujours de l'emploi du nombre complexe conjugué, de manière à ce que lors des calculs les parties imaginaires se compensent laissant la place à des nombres réels, seuls nombres ayant un sens physique.

NOMBRE D'OR

Le nombre d'or, est un nombre irrationnel*, aux très riches propriétés arithmétiques et géométriques. Associé depuis l'Antiquité et la Renaissance à des problématiques géométriques, il se révèle aujourd'hui au cœur de problématiques dynamiques et probabilistes. Ce qui pouvait sembler une recherche d'un partage bien proportionné de l'espace peut s'avérer en fait la recherche d'un bon échantillonnage de données spatiales ou temporelles. Ce nouveau point de vue, rattachant le nombre d'or à une problématique plus générale, en abolit l'aspect mystique et singulier, et anéantit les tentatives récentes de lui faire jouer un rôle décisif dans l'esthétique mathématique*. Cet emploi bien particulier en esthétique, n'est attesté par aucun document avant le XIX^{ème} siècle. Quant à un emploi réel inconscient dans la composition des œuvres, dans le cadre d'une esthétique des proportions*, une analyse honnête permet d'en douter, malgré les nombreuses affirmations tendancieuses à ce sujet. Les tracés régulateurs imposés à posteriori aux œuvres sont très loin d'être convaincants, et relèvent souvent d'une adhésion inconsidérée à la symbolique des nombres.

On assiste en fait aujourd'hui à une transition d'une esthétique des proportions, de la symétrie et de l'ordonnement à une esthétique de l'intelligibilité de l'objet complexe où la représentation simplifiée des formes joue un rôle central. C'est dans ce passage de la

géométrie à la théorie de l'information et de la complexité que le nombre d'or pourrait se voir attribuer un rôle tout à fait inattendu.

Les considérations contemporaines sur l'esthétique mathématique ne se fondent pas sur des considérations de proportions mais sur des évaluations de complexité, qui rendent le problème esthétique du nombre d'or bien désuet.

Avant d'examiner en détail ce que nous appelons le mythe du nombre d'or, rappelons rapidement les points essentiels de son histoire mathématique. Une histoire qui n'est certainement pas close, car le nombre d'or est un feu d'artifice de propriétés mathématique variées qui le rattachent à de très nombreux domaines de l'arithmétique et de la géométrie.

R. Herz-Fischler examine en détail le texte des éléments d'Euclide, où apparaît pour la première fois et à plusieurs reprises la construction de la division d'un segment en moyenne et extrême raison.

Avant de devenir un problème arithmétique, le nombre d'or est un problème géométrique, traité par des constructions géométriques.

Au livre VI des Eléments on trouve la proposition 30 :

Diviser une droite finie en extrême et moyenne raison.

Une construction élaborée utilisant la proposition 29, permet de déterminer un point entre A et B tel que

$$AB/AE = AE/EB$$

AE est donc la moyenne géométrique entre le segment AB et le segment EB, entre le tout et le reste.

C'est la valeur commune de ces rapports, indépendante du segment AB considéré, 1,61803....., qui sera appelée (beaucoup plus tard) le nombre d'or. C'est cette division du segment qui deviendra la section dorée.

Au livre II on trouve la proposition 11 :

Diviser une ligne droite donnée de sorte que le rectangle contenu par le tout et un des segments soit égal au carré construit sur le segment restant.

La construction proposée commence par tracer le carré ABCD de côté AB, appelle H le milieu du côté AC de ce carré, prolonge HA

jusqu'à f de manière à ce que $HF=HB$ et construit le carré AFGE. Ce carré a la même surface que le rectangle de côtés EB et AB.

Autrement dit

$$AB \cdot EB = AE \cdot AE$$

Ce qui prouve que le segment AB est divisé par E en extrême et moyenne raison. Mais Euclide n'en fait pas la remarque, car contrairement à la proposition 30 qui doit lui appartenir, il rapporte sans doute là une construction plus ancienne, peut-être pythagoricienne.

Il y a effectivement dans les *Eléments*, consignation de résultats connus par Euclide mais qui ne sont pas obtenus par lui.

Ainsi dans le livre XIII, les neuf premières propositions qui sont préliminaires à la construction et à la comparaison des cinq solides réguliers et utilisent les propriétés d'un segment divisé en moyenne et extrême raison, c.a.d. en fait II, 11, sont usuellement attribuées à Eudoxe (contemporain de Platon). Proclus (412-485) dans ses commentaires sur les *Eléments*, affirme qu'Eudoxe « ajouta de nombreux théorèmes à ceux que Platon obtint sur la section ».

Cette « section » est elle notre section dorée ?

Il est difficile de dire si Platon avait conscience de la signification de résultats dont Euclide lui même ne voit pas souvent le rapport avec la section dorée (Cf. Section20).

C'est nous aujourd'hui qui constatons l'emploi implicite de la section dorée, en particulier lorsque le théorème II, 11 est utilisé. C'est ainsi le cas pour la proposition IV, 10 pour construire un triangle isocèle ayant chacun des angles à la base double de l'angle restant (le triangle 72° - 72° - 36°), et la proposition IV, 11 qui en découle pour inscrire un pentagone ordinaire dans un cercle.

Notons que les diagonales du pentagone régulier se coupent en définissant des sections en moyenne et extrême raison.

Pour Euclide tout ceci n'a pas une signification exceptionnelle et fait partie d'un énorme arsenal de constructions géométriques.

Il en sera de même pendant des siècles. Archimède, Ptolémée, les géomètres arabes et leurs héritiers médiévaux en Occident, connaissent Euclide et utilisent toutes ses constructions sans privilégier aucunement la « section ».

Les *Eléments* font l'objet de nombreux commentaires à l'époque scholastique, dont ceux d'Albert le Grand et de Roger Bacon. L'un et l'autre font largement appel au commentaire d'Al Nayziri traduit par Gérard de Crémone (1114-1187), grand traducteur de textes arabes. Mais c'est l'édition d'Euclide et le commentaire de Campanus de Novare, rédigé sans doute entre 1255 et 1261, qui eurent sur la science occidentale une influence déterminante à la mesure du succès de l'ouvrage dont témoigne sa diffusion et sa réédition. Les *Eléments* jouent un rôle décisif dans la constitution de la pensée scientifique, à la base de l'enseignement de toute science comme de tout savoir encyclopédique. Aucune attention particulière n'est donnée à la « section ».

Il faudra attendre qu'un mathématicien italien, Luca Pacioli, publie à Venise en 1509 un ouvrage intitulé « *De divina proportione* » pour que la divine proportion vienne sur le devant de la scène mathématique. Encore que ce livre ne contienne aucun résultat nouveau, aucune recommandation aux artistes, et ne soit qu'une compilation munie de titres exaltés des parties des *Eléments* d'Euclide concernant la « section ». Elève de Pierro della Francesca, ami de Leonardo da Vinci qui a contribué à illustrer l'ouvrage, étant certainement connu de Dürer, Luca Pacioli n'a notablement pas transmis à ces artistes un enthousiasme particulier pour la divine proportion, bien que ceux-ci la connaissent bien évidemment et l'utilisent dans la construction de polygones réguliers (le pentagone et le dodécaèdre).

Les raisons de l'appellation « divine » sont chez Luca Pacioli d'ordre métaphysique, platoniciennes et chrétiennes. En matière esthétique, Pacioli n'a qu'une approche conventionnelle et vitruvienne des proportions. Le corps humain reste à l'origine de proportions harmonieuses. Et si son ami da Vinci trouve la divine proportion dans le corps humain il n'en tire pas de conséquences esthétiques particulières.

Ce n'est qu'au XVII^e siècle avec Kepler que la divine proportion sort de son contexte géométrique pour prendre un caractère arithmétique avec la découverte que le rapport des termes successifs de la série de Fibonacci converge vers le nombre d'or. Par ailleurs on établira que les approximations successifs du nombre d'or dans son développement en fraction continue sont des fractions simples $3/2, 5/3, 8/5, \dots$

Le problème du nombre d'or comporte deux aspects totalement distincts. Il y a d'une part l'histoire mathématique du nombre d'or,

qui remonte pour ce que nous en savons au moins au 3^{ème} siècle avant J.C. avec les *Eléments* d'Euclide. Il y a d'autre part un courant de pensée fortement empreint d'ésotérisme, qui cherche à attribuer au nombre d'or et à la section dorée des vertus esthétiques. Ce courant de pensée a une origine précise, le livre d'Adolf Zeising en 1854 :

« Neue Lehre von den Proportionen des menschlichen Körpers aus einem bisher unerkannt gebliebenen, die ganze natur und Kunst durchdringenden morphologischen Grundsetze entwickelt und mit einer vollständigen historischen Uebersicht der bis herigen Systeme begleitet

Weigel. Stuttgart.

Nouvelle théorie des proportions du corps humain développée à partir d'une loi morphologique de base restée jusqu'à présent inconnue et qui imprègne toute la nature et l'art, accompagnée par un résumé historique complet des systèmes en usage.

Avant 1854 personne n'a jamais explicitement formulé un quelconque emploi esthétique du nombre d'or, comme cela sera le cas dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle et au XX^{ème} siècle. Si l'on semble si souvent trouver le nombre d'or dans les proportions architecturales ou picturales, c'est sans doute bien involontairement par suite sans doute de l'emploi de constructions géométriques qui le font facilement intervenir. Ainsi la question qui se pose est double : la section dorée remplit elle véritablement les fonctions esthétiques que ses utilisateurs lui assignent ? Sans utiliser explicitement et intentionnellement la section dorée, les créateurs du passé la laissent-ils s'introduire dans leurs œuvres ? Si le nombre d'or n'a pas les vertus qu'on lui prête pourquoi se serait-il glissé insidieusement là où on ne l'attendait pas ?

L'histoire des conceptions esthétiques aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, tout en laissant place à un prolongement des idées de la Renaissance, est marquée par deux courants successifs.

Un courant rationaliste, influencé par le développement des sciences exactes. Une esthétique rationnelle, architecturée par les mathématiques, et dont la musique baroque est la plus belle expression.

Un courant organique, lié à la naissance et au développement de l'histoire naturelle. Une esthétique de la connaissance et de l'intelligibilité, fortement marquée par l'empirisme anglais.

Il est notable que dans le cadre de l'esthétique de la raison, axée sur la rigueur du système des formes et sur les idées « d'ordre, d'arrangement, de symétrie, de mécanisme, de proportion, d'unité » comme l'énonce Diderot dans l'Encyclopédie, il ne soit venu à personne l'idée d'ériger en canon esthétique la divine proportion. C'est qu'à l'univers ordonné de la Renaissance, où règnent la géométrie et l'harmonie musicale, clos et statique, l'époque baroque substitue un univers en mouvement et une raison dynamique, où la simple considération des proportions dans l'équilibre cède la place à une ouverture des formes. La divine proportion n'a rien à faire dans ce contexte.

C'est un allemand, Adolf Zeising, qui a franchi le pas en 1854, en plein Romantisme, et dans une atmosphère d'esthétique philosophique correspondant à la constitution en Allemagne d'une science de la connaissance esthétique.

L'œuvre de Zeising est très peu étudiée, tant du point de vue de ses sources d'inspiration que de l'impact de ses écrits.

On peut seulement remarquer que quelques années avant la publication de son ouvrage, une certaine attention se porte sur la section dorée dans des publications allemandes.

Le terme « section dorée » a été créé par des mathématiciens allemands qui l'utilisent dans des manuels de géométrie et de mathématiques, dans les années 30 du XIX^{ème} siècle. Citons :

F. Wolff. Lehrbuch der Geometrie. Rainer. Berlin. 1833.

M. Ohm. Die reine Elementar Mathematik. Jonas. Berlin. 1835.

J.J. Kroll. Grundriss der Mathematik für Gymnasien und andere höhere Lehranstalten. Reichardt. Eisleben. 1839.

En 1849 paraît un petit ouvrage sur les propriétés spéciales de la section dorée :

A. Wiegand. Der allgemeine goldene Schnitt und sein Zusammenhang mit der harmonische Teilung. H.W. Schmidt. Halle. 1849.

La même année paraît un nouveau livre sur l'analyse des proportions dans le corps humain :

B. Schmidt. Proportionschlussel. Neues System der Verhältnisse des menschlichen Körpers. Stuttgart.

Mentionnons aussi le livre de D.R. Day. *Proportion or The geometric principle of beauty*. Blackwood. Edinburgh. 1843.

Après avoir discuté les théories régnantes les proportions du corps humain et les proportions dans l'art et dans la nature, Zeising développe une esthétique originale, issue de l'esprit romantique et idéaliste. Dans cette théorie la Section Dorée joue un rôle important en tant que compromis parfait entre l'unité absolue et la variété absolue. Echo peut être de ce débat entre la raison et la passion, l'ordre et la variété, qui domine le XVIII^{ème} siècle, et que Francis Hutcheson, célèbre philosophe de l'esthétique, a formulé en ces termes en 1725 :

« Ce que nous appelons beau dans les objets, pour s'exprimer dans le style mathématique, semble résider dans un rapport composé d'uniformité et de variété ».

Zeising voit en quelque sorte la section divine comme image idéale de ce rapport.

Suivons l'analyse du phénomène Zeising que fait Marcus Frings.

Zeising est convaincu que dans la Section Dorée

« se trouve le principe fondamental de toute formation tendant vers la beauté et la totalité dans le domaine de la nature et dans le champ des arts picturaux, et que c'était là dès le tout début le but le plus élevé et l'idéal de toutes les figurations et relations formelles, cosmiques ou individuelles, organiques ou inorganiques, acoustiques ou optiques, en trouvant sa plus parfaite réalisation dans la figure humaine ».

Après l'analyse de l'homme idéal il examine les statues antiques et explique les différences entre sexes, races et stades de la vie de l'embryon au vieillard, puis considère la nature, les étoiles, les cristaux, les plantes et les animaux. En accord avec la vieille idée « *natura naturans* », Zeising déclare que l'homme doit continuer la nature dans ses propres créations en utilisant la Section Dorée. Il examine des œuvres d'art comme le Parthénon- il est le premier à en

publier une analyse où il trouve manifestation de la Section Dorée, la cathédrale de Cologne ou la Madone de Raphaël.

Il ne faut pas sous-estimer l'impact de Zeising. C'est lui qui a introduit la Section Dorée dans les écrits sur l'art. Il est véritablement l'inventeur de son rôle dans l'architecture et les arts picturaux.

En une étrange combinaison d'esthétique idéaliste et d'analyse prétendue scientifiquement exacte, il proclame une vérité simple sur les manifestations complexes de la nature et sur les formes divergentes de l'art, qui ne montre pas à cette époque de réelle unité. En un temps d'incertitude profonde, Zeising revient à une esthétique anthropocentrique et normative, qui semblait ne plus avoir cours depuis le Rationalisme français et l'Empirisme anglais au XVIII^{ème} siècle. Il réhabilite l'homme comme le couronnement de la création à cette époque du débat darwinien, il réhabilite le concept de l'harmonie du cosmos, qu'il trouve en accord intelligible avec la production artistique de l'humanité. C'est probablement cette affirmation d'unité qui a valu à Zeising l'immense popularité de sa théorie formulée avec tant de conviction. De nombreux « disciples » adoptèrent de son vivant son axiome fondamental, et en étendirent l'application.

De toutes les tentatives de formulation d'une esthétique des proportions dans l'histoire de l'art, celles consacrées à la Section Dorée sont les plus nombreuses et les plus étendues.

Quoique ces morphologies universelles puissent être envisagées dans le cadre d'une tradition de positivisme rationnel, de nombreuses études métaphysiques sont apparues depuis le début du XX^{ème} siècle. La plus célèbre est celle de Mathyla Ghyka .

Par ailleurs un certain nombre d'artistes se sont laissé séduire par ces idées d'esthétique scientifique des proportions. Marguerite Neveux , après avoir présenté l'œuvre de Zeising et son influence, examine de manière critique les tentatives faites pour utiliser la Section Dorée à partir des dernières années du XIX^{ème} siècle. Desiderius Lenz, Jan Verkade, Paul Sérusier, Maurice Denis, Duchamp et son frère Jacques Villon, Juan Gris, Matisse, et deux architectes Ernest Neufert et Le Corbusier avec son célèbre Modulor. Rien de bien convaincant en effet dans toutes ces œuvres.

Et pourtant le phénomène nombre d'or déferle sur le XX^{ème} siècle et l'on ne compte plus les publications à ce sujet. L'emploi des tracés régulateurs prétendant retrouver les vertus du nombre d'or dans les œuvres d'art anciennes, acquiert un statut dans les écoles d'art et s'intègre dans la culture artistique. Sans tenir compte des

critiques qui soulignent en particulier la sensibilité de ces reconstructions aux données utilisées, notamment à la manière dont sont effectuées les mesures. Echo d'une problématique que les mathématiciens connaissent bien mais que les historiens d'art ignorent : l'instabilité des problèmes inverses.

Des ouvrages comme ceux de Charles Bouleau ou d'Elisa Maillard, conservatrice du Musée de Cluny à Paris, contribuent à donner à ces spéculations une honorabilité dont tout un chacun se prévaut.

C'est ainsi que dans le catalogue accompagnant l'exposition Jean Fouquet à la Bibliothèque Nationale à Paris, une conservatrice se livre à une analyse détaillée, à coup de tracés géométriques, de l'emploi du nombre d'or par ce peintre du XV^{ème} siècle, qui n'a même pas eu comme le Vinci ou Dürer le bonheur de lire Luca Pacioli. La plaisanterie n'a plus de limite, avec la bénédiction du Directeur de la Bibliothèque Nationale.

En fait depuis le XIX^{ème} siècle, la pratique qui consiste à tracer des lignes sur des dessins de façades afin de révéler des systèmes invisibles de proportions est devenue tout à fait commune. Heinrich Wölfflin dans son analyse pionnière des églises de la Renaissance et du Baroque définit l'approche standard de l'analyse des proportions dans le plan et la façade. Au milieu du XX^{ème} siècle, lorsque Rudolf Wittkover publie son livre très influent : « Architectural principles in the age of humanism », les historiens de l'art et de l'architecture effectuaient des tracés « révélant » la section dorée dans d'innombrables monuments historiques, peintures et sculptures. Un exemple classique d'une telle démarche se trouve dans Rob Krier : « Architectural composition » en 1988. En 1947, Colin Rowe a publié un essai qui a eu beaucoup d'influence sur la « mode du nombre d'or » : « The mathematics of the ideal villa » où il compare les systèmes de proportions chez Palladio et le Corbusier.

Dans les trente années qui suivirent, de multiples conférences à travers le monde proclamèrent que la section dorée sous tend un système universel de la beauté.

Mais dans les années 70 des critiques commencent à se faire jour, et sont formulées dans des conférences dans les années 80 et 90. En France en 1995, Marguerite Neveux publie un essai critique fort remarqué. En 1998, une conférence organisée à Mantoue (Italie) par l'influente revue Nexus : « Nexus : Architecture and Mathematics », a été l'occasion d'un vif débat sur la moyenne dorée.

Débat inauguré par l'intervention de Marco Frascari et Livio Volpi Ghirardini : « *Contra Divinam Proportionem* ».

Ils se livrent à une critique en règle de l'utilisation des mesures architecturales pour la mise en évidence de la section dorée, soulignant la diversité de ce que l'on peut mesurer dans un bâtiment. De ce fait les chercheurs utilisent trop souvent ce qui leur convient et ignorent ce qui ne confirme pas leurs vues. Par ailleurs on trouve en architecture de nombreux systèmes de proportions que l'on peut avec indulgence faire passer pour la section dorée : $5/3$ ou $3/5$, $8/5$ ou $5/8$. Notons par exemple que $5/8 = 0,625$ alors que $1/\Phi = 0,618$, et que 5 et 8 sont deux nombres successifs de la suite de Fibonacci.

M. Neveux discute aussi ce point pour les peintres, pour lesquels la division des dimensions du tableau en huitièmes (moitié, quart, demi-quart) est naturelle. Viollet le Duc avait déjà d'ailleurs remarqué que le rapport de 5 à 8, rapport que l'œil ne peut définir, permet d'obtenir une dissemblance, un contraste, nécessaires pour satisfaire à la première loi des proportions.

En fait Le Corbusier lui même avait d'abord tenté d'utiliser le nombre d'or, mais trouvant les résultats peu satisfaisants, s'était rabattu sur $5/3$ et $8/5$. Ceci est examiné en détail dans le livre récent de Robin Evans : « *The projective cast : Architecture and its three geometries* », où l'on analyse la difficulté technique de mettre en évidence la section dorée, tout en concluant sur son absence en général dans l'architecture.

Les auteurs italiens remarquent ironiquement que Zeising et Gunter étaient sans doute très adroits dans la mesure des images, mais il est tout à fait clair qu'aucun des deux n'a jamais mesuré un édifice en suivant les principes de la tectonique.

En 1997 la revue « *Empirical Studies of the Arts* », organe de la Society for Empirical Aesthetics, a publié un numéro spécial sur la section dorée. Le diagnostic général est sévère. L'éditeur de ce recueil, Holgar Höge, déclare que l'hypothèse de la section dorée est un mythe, et annonce ses ultimes funérailles, en rapportant les expériences récentes montrant que contrairement à ce que prétendait le physiologiste Fechner au XIX^{ème} siècle, il n'y a pas de préférence avérée pour des cadres rectangulaires dont les côtés sont dans le rapport doré. Par ailleurs une étude statistique menée sur 565 tableaux de grands peintres de différentes époques confirme ce résultat. Les tableaux de Bellini, Caravaggio, Cézanne, Goya, Van Gogh, Delacroix, Pallady (un peintre roumain), Rembrandt, Toulouse

Lautrec, ont été examinés pour déterminer le rapport entre les deux côtés du rectangle de la toile peinte. Les rapports trouvés vont de 1 à 1,46, avec pour valeur moyenne 1,34. Tout ceci est bien loin de 1,618.

En cherchant à fonder sur le nombre d'or une esthétique des proportions notre époque succombe avant tout à une illusion moderniste sur les anciennes conceptions des mathématiques et sur les conceptions de la beauté. D'une manière générale l'époque moderne, à partir du 17^e siècle, est marquée par un remplacement progressif du concret par l'abstrait, et vouloir projeter ces conceptions abstraites dans le passé relève de l'anachronisme caractérisé. Ainsi le pythagorisme et le platonisme ne donnent pas au nombre et aux proportions le caractère abstrait qu'ils ont aujourd'hui. Quant à la notion abstraite de beauté créant une différence entre les beaux-arts et l'artisanat elle date somme toute du 18^e siècle. Vouloir établir un canon universel de la beauté est une idée structuraliste en accord avec les pratiques des mathématiques contemporaines.

NOMBRE ENTIER

Notion intuitive liée à la numération d'ensembles d'objets identiques, où s'introduit la notion d'ordre*. Numération de points équidistants sur une droite. Les nombres entiers peuvent être positifs ou négatifs, selon la fixation d'une origine.

NOMBRE IRRATIONNEL

Nombre qui ne peut s'exprimer comme rapport de deux nombres entiers naturels. Ajoutés aux nombres rationnels ils forment l'ensemble des nombres réels*.

On distingue parmi les nombres irrationnels, des nombres algébriques* et des nombres transcendants*. Les nombres réels algébriques sont un infini* dénombrable. Les nombres transcendants confèrent aux nombres réel leur puissance* du continu*.

Les nombres irrationnels ont des propriétés particulières.

L'ensemble des points sur un cercle obtenus par rotations successives d'un angle α tel que α / π soit irrationnel est uniformément réparti. La suite $\{n\alpha\}$ où α est irrationnel, et $\{a\}$ signifie la partie fractionnaire de a , est équidistribuée*.

L'irrationalité est au cœur de l'équidistribution. Nombres irrationnels et distribution de points dans l'espace, une même problématique. Voilà qui nous rapproche du nombre d'or*..... et du hasard*.

NOMBRE NATUREL

Nombre entier* positif. Concept de base de toute la mathématique. Correspond à la notion de dénombrement et de mise en file(queue leu leu)

Peano en 1891 a donné une définition des nombres naturels à l'aide de cinq axiomes :

0 est un nombre naturel

le nombre qui suit un nombre naturel est un nombre naturel

0 ne se trouve après aucun nombre naturel

tout nombre naturel succède à un seul nombre naturel

axiome de l'induction totale : Si un ensemble d'entiers naturels contient 0 et contient le successeur de chacun de ses éléments, alors cet ensemble est égal à \mathbb{N} , l'ensemble de tous les nombres naturels.

La notion d'ordre* est capitale.

Le nombre naturel est une concrétisation de la notion d'ordre*.

L'ensemble des entiers naturels est un ensemble infini dit dénombrable, dont le nombre cardinal est aleph zéro, le plus petit des cardinaux infinis.

NOMBRES QUANTIQUES

Les nombres quantiques sont des nombres entiers ou fractionnaires qui définissent les valeurs possibles des grandeurs physiques caractéristiques des systèmes quantiques (particules élémentaires, noyaux atomiques, atomes, molécules).

L'apparition de ces nombres, témoins d'un pythagorisme microphysique, conditionne le caractère essentiel des théories quantiques: de nombreuses grandeurs physiques observées ne peuvent prendre qu'un ensemble discret de valeurs. C'est la quantification* au sens originel du terme, telle qu'elle apparaît pour la première fois dans la théorie du rayonnement du corps noir* de Planck*. En fait les nombres quantiques sont apparus tout d'abord de manière empirique dans la représentation numérique des lois de classification des raies (discrètes) dans les spectres* atomiques. C'est la synthèse de ces deux manifestations initiales des nombres quantiques qui s'accomplit dans le modèle quantique de l'atome de Bohr*.

Dans le monde mystérieux et invisible de la microphysique, les nombres quantiques témoignent de l'existence même d'entités stables dont l'identité ne fait pas de doute. C'est ce qui donne aux nombres quantiques un sens très général, traduisant des propriétés de stabilité et d'invariance au cours du mouvement et dans les processus d'interaction. On peut dire que les nombres quantiques participent du " principe d'individuation*".

Les nombres quantiques sont liés à l'invariance adiabatique* tant dans l'ancienne théorie quantique de Bohr*-Sommerfeld*, où les grandeurs soumises à la quantification* sont des invariants adiabatiques, que dans la Mécanique Quantique où les nombres quantiques caractérisent les états stationnaires* (états privilégiés qui sont des états invariants adiabatiques) et sont de ce fait eux mêmes invariants adiabatiques.

Par ailleurs, l'apparition des nombres quantiques est liée à l'existence de propriétés de symétrie du système (Wigner* 1927), c.à.d. aux représentations irréductibles des groupes* de symétrie, et donc d'après le théorème de Noether*, à la présence de quantités physiques conservées.

Les lois de conservation* sont en fait la plupart du temps des lois de restriction, et les nombres quantiques sont l'expression mathématique des limitations des valeurs possibles des quantités conservées, provoquées par les propriétés de symétrie correspondantes.

Ainsi dans l'atome d'hydrogène, la symétrie sphérique a pour effet de limiter les états quantiques possibles de l'électron en limitant les valeurs que peuvent prendre certaines observables. Les valeurs possibles de l'énergie de l'électron dépendent d'un nombre quantique principal n ($n= 1,2,3,\dots$), les valeurs possibles du carré du moment de la quantité de mouvement dépendent du nombre quantique orbital l ($l= 0,1, \dots,n-1$), quant à la projection du moment orbital selon un axe

quelconque, elle dépend du nombre quantique magnétique m_l ($m_l = -l, -(l-1), \dots, (l-1), l$). La chimie quantique* fait un usage massif de ces concepts.

On définit d'autres nombres quantiques comme le nombre quantique de spin* $m_s = +$ ou $- 1/2$, la parité $P = +$ ou $- 1$ selon que la fonction d'onde* change de signe ou non lorsque l'on change de signe toutes les coordonnées spatiales.

Outre les nombres quantiques associés aux symétries d'espace-temps, un rôle essentiel est joué par des nombres quantiques associés aux symétries internes*. Ces nombres quantiques jouent un rôle dans les interactions entre les particules élémentaires en conservant éventuellement leur valeur. Les différents types d'interaction sont caractérisés par différentes propriétés de symétrie (l'interaction est d'autant plus forte que sa symétrie est plus grande), si bien que les nombres quantiques dont les valeurs se conservent dans certaines interactions, peuvent ne pas se conserver dans d'autres.

Les nombres quantiques qui se conservent exactement dans toutes les interactions sont:

- le nombre quantique de charge électrique*
- le nombre quantique de charge baryonique*
- les nombres quantiques de charge leptonique*

Les plus importants des nombres quantiques qui ne se conservent pas dans toutes les interactions sont:

- le nombre quantique de spin isotopique* lié à ce que l'interaction forte ne distingue pas entre le neutron et le proton
- le nombre quantique d'étrangeté*
- le nombre quantique de charme*
- le nombre quantique de couleur*

L'étrangeté*, le charme* et la couleur* totales se conservent dans les interactions fortes* et électromagnétiques*.

NOMBRE RATIONNEL

Nombre exprimable comme quotient de deux entiers naturels

NOMBRE REEL

Nombre limite d'une suite infinie de nombres rationnels* (suite fondamentale de Cantor), rationnel ou non rationnel (algébrique* ou transcendant*).

Le nombre réel est une abstraction mathématique résultant de la nécessité de mesure de grandeurs géométriques et physiques, et d'opérations comme l'extraction de racines, le calcul des logarithmes ou la résolution des équations algébriques.

Si les nombres naturels sont apparus dans le processus de numération, les nombres rationnels* dans la nécessité d'opérer sur les parties, les nombres réels ont été définis pour la mesure de grandeurs continues*. Ils résultent d'un enrichissement des nombres rationnels permettant de repérer tous les points sur une portion de droite.

NOMBRE TRANSCENDANT

Tout nombre réel irrationnel qui n'est pas un nombre algébrique*. e et π sont des nombres transcendants.

NOMINALISME

Tendance de pensée de la philosophie médiévale niant la réalité objective des concepts ou des images mentales, comme intermédiaire entre les mots*, les noms* et les choses*. Un rejet des objets abstraits et des universaux*. Seules existent les choses individuelles, tout le reste n'est que discours. Le mot chien ne mord pas.

Il y a une unité ontologique de ce qui existe et la concordance avec notre intuition* de la multiplicité des modes d'être des choses est assurée au moyen de constructions logiques ou linguistiques. Les choses n'ont pas de nature propre, mais seulement un statut dans un système de reconstruction des apparences.

Le nominalisme est un réisme*, opposé au platonisme* et au réalisme* ontologique. La philosophie analytique* contemporaine se sent souvent très proche du nominalisme médiéval. Le nominalisme est vivant dans les discussions modernes sur les fondements des mathématiques chez les constructivistes* (Brouwer) et les formalistes (Bourbaki*).

Considérer le Vide Quantique* comme n'étant qu'un signe* dans une théorie est une attitude parfaitement nominaliste, avec une saveur de conventionnalisme* et une pointe d'instrumentalisme*.

Cette idée avait déjà exprimée par un célèbre nominaliste, Albert de Saxe (1316-1390). Ce n'est pas parce que l'on peut définir le vide qu'il existe!

«il faut bien comprendre que ce nom de "vide" est un terme privatif et n'est valable que pour signifier " une place qui n'est pas remplie par un corps ". Donc, lorsque "le vide" est mentionné c'est "une place qui n'est pas remplie par un corps". La définition est posée pour ce qu'elle signifie. Mais il ne s'ensuit pas que, parce que " le vide est une place qui n'est pas remplie par un corps", " le vide existe..... ".....

Questions sur la Physique d'Aristote. Livre IV. Question 8.

Les physiciens contemporains feraient bien de s'en souvenir. Le physicien Barut le rappelle fort à propos en 1994: " Ce n'est pas parce que l'on attache un nom* à une entité qu'on la comprend complètement". Il parle ici de "l'électron" qui semble pourtant un concept plus palpable que le vide.

NON-COMMUTATION (d'opérateurs)

Deux opérateurs ne commutent pas lorsque leur action successive sur un vecteur dépend de l'ordre de celles-ci. Deux opérateurs qui commutent ont le même ensemble de vecteurs propres. C'est la non commutation des opérateurs qui est responsable de l'inégalité de Robertson* et donc de l'inégalité de Heisenberg* en M.Q. et donc traduit l'existence d'observables non compatibles*.

NON-ETRE(Cf. Rien*)

NON INTEGRABLE(Cf. Intégrabilité*)

NON LINEAIRE (Cf. Linéaire et non linéaire*)

Les phénomènes linéaires sont en général des phénomènes de faible amplitude ou de faible intensité, si bien que la linéarité constitue en général un comportement approximatif, qui facilite le traitement mathématique des problèmes. D'une manière générale les phénomènes d'une certaine amplitude ou d'une forte intensité sont des phénomènes non linéaires. Ce sont des phénomènes où la réponse n'est pas proportionnelle à l'action et qui ne sont pas décrits par des systèmes d'équations différentielles linéaires.,

L'évolution de la science du non-linéaire a procédé par paliers, avec des aller-retours entre développement des méthodes et techniques mathématiques et application à des phénomènes réels. Mais plus que d'autres peut-être, cette science dépend très étroitement des mathématiques appliquées. Au XIXème siècle, il s'agissait pour les mathématiciens de résoudre des équations différentielles non-linéaires, l'exemple-type étant fourni par la mécanique céleste. Cependant, dès la moitié du siècle, les problèmes non-linéaires s'étudiaient au cas par cas sans concept général, comme par exemple pour les ondes non-linéaires (Stokes 1847, Riemann 1858). Avec H. Poincaré qui établit

les bases unificatrices pour l'étude des problèmes de la mécanique non-linéaire et Liapounov qui pose le problème général de la stabilité, les outils mathématiques nouveaux apparaissent.

Dans les années 1927-1938, l'école russe surtout (Mandelstam-Andronov) commence à appliquer ces méthodes à des modèles en relation avec des problèmes pratiques en mécanique des vibrations de structures, en électricité (oscillateurs*), et en optique (diffraction*). Par ailleurs, d'autres écoles se développent et les applications sont même étendues en science du vivant (rythmes cardiaques : Van der pol et Van der Mark 1928; dynamique des populations : Volterra 1931 [5]).

Dans son "Introduction to Non-Linear Mechanics ", un cours sur des applications pour les ingénieurs de la marine, N. Minorsky note en 1944:

.... *Practically all differential equations of Mechanics and Physics are non-linear...*". En d'autres termes, la Physique (représentation du monde réel) est d'abord non-linéaire.

Il apparaît donc déjà que la solution à certains problèmes concrets passe par l'étude complète des modèles non-linéaires : "...*Thus, it became necessary to attack the non-linear problems directly instead of evading them by dropping the non-linear terms..*"

Dans les années 1960-80 les outils mathématiques sont encore développés ("systèmes dynamiques*") et les applications deviennent très nombreuses en hydrodynamique, optique, mécanique, matière condensée, métallurgie et même en sociologie, économie etc..

Actuellement, le message de Minorsky est toujours d'actualité et pourtant les méthodes et concepts de la Physique non-linéaire diffusent lentement dans pratiquement tous les domaines. La physique non-linéaire est à la fois un domaine fondamental de la science et un thème unificateur largement interdisciplinaire.

Parmi les domaines de recherche où la non linéarité joue un rôle essentiel citons la théorie du chaos déterministe*, les ondes non linéaires*, l'optique non linéaire*.

On insiste d'ordinaire sur l'exaltation des phénomènes et les instabilités que provoque la non-linéarité. Il est moins courant de souligner que la non linéarité introduit essentiellement une globalité des phénomènes. Une nécessité de considérer les phénomènes sur une grande échelle d'espace et de temps pour qu'ils prennent un sens. La non-linéarité introduit une non-localité.

Il n'est pas permis de se borner à l'analyse du comportement d'un système non-linéaire au voisinage seulement des différents états. Il est nécessaire de connaître la solution du problème non linéaire

décrivant tout le processus de transition d'un état d'équilibre à un autre et de ce fait couvrant un intervalle infini de variation des variables. L'instabilité ou la sensibilité aux conditions initiales ne sont pas des phénomènes locaux, mais peuvent demander un long déroulement de la trajectoire pour se manifester.

Ainsi le chaos déterministe est une propriété globale de la trajectoire, inscrite pour ainsi dire dans la trajectoire. Le hasard par inaptitude à la réalisation des conditions initiales est une dénomination malheureuse.

L'idée que le non linéaire, étant non local, a fondamentalement partie liée avec la géométrie*est profonde et essentielle. On peut par ailleurs se demander si la non localité de la M.Q. n'apparaît pas comme un paradoxe dans une théorie linéaire, alors qu'elle exprimerait une globalité naturelle dans une théorie non linéaire alternative. L'effet de la linéarisation ou plutôt de la simulation par une théorie linéaire, a pour mérite de reproduire les états stationnaires mais élimine toute description des transitions.

NON-LOCALITE

La non-localité des corrélations quantiques n'est pas une action à distance*. Elle ne permet pas de transfert d'information. Elle stipule simplement que du point de vue de l'observation, point de vue central de la M.Q., un état enchevêtré* entraîne une corrélation entre observations à des points distants. Le système reste enchevêtré à grande distance lorsqu'il est isolé. Ce sont les observations qui sont non-locales. Que signifie cela pour le système microscopique lui-même ?Bell* affirme que cela exclut tout modèle à variables cachées* locales et pointe du doigt l'interprétation de de Broglie-Bohm* de la M.Q. En fait Bell prouve simplement la non existence de variables cachées locales satisfaisant au calcul de probabilité kolmogorovien, mais n'exclut pas pour autant tout modèle à variables cachées locales. Ceci laisse ouverte la discussion sur la non-localité en M.Q.

La nonlocalité de la M.Q. apparaît comme un paradoxe dans une théorie linéaire*, alors qu'elle exprimerait une globalité naturelle dans une théorie non linéaire* alternative. En fait c'est un principe global de symétrisation pour les particules indiscernables qui introduit les corrélations quantiques et la non localité qu'elles impliquent.

NON OBSERVABLE

Objet* ou terme théorique* non observable directement.

Le mécanique de Newton associe des propriétés non observables aux entités observables, comme les forces* ou la masse*. La mécanique

quantique* manipule des objets théoriques qui ne peuvent être observés par perception directe ; aucune de leurs propriétés ne peut leur être attribuée sur la base de notre connaissance visuelle d'une de leurs manifestations. Personne n'a jamais vu un électron.

La question des non observables est au centre de bien des discussions en épistémologie et en philosophie des sciences. Elle est au cœur des débats sur le réalisme scientifique* ou sur le positivisme*. Elle participe à une reviviscence de la métaphysique*. Elle flirte avec l'occultisme*. La mécanique quantique parle même d'un réel voilé en raison de sa stratégie de la boîte noire*et de sa conception de la mesure*.

L'emploi de non observables dans la physique contemporaine jette sur celle-ci un éclairage trouble, mal accepté par beaucoup de physiciens.

NOOSPHERE

Du grec, noos-raison et sphère.

Sphère d'interaction de la nature et de la société, dans laquelle l'activité k de l'homme devient le facteur dominant de l'évolution. La noosphère est conçue comme une enveloppe idéale de pensée entourant la sphère terrestre, dont la formation est liée à l'apparition et au développement de la conscience humaine. Une nappe psychique qui enveloppe la biosphère et se développe au gré de l'activité consciente de l'homme.

Le concept est devenu célèbre par son emploi par Teilhard de Chardin* et Vernadsky*.

NORMAL

Du latin, norma, l'équerre, le mot normale ou ligne normale désigne une perpendiculaire d'un point à une droite, c'est à dire une ligne qui ne penche ni à droite ni à gauche, et ne présente ainsi aucun caractère marquant autre que celui de servir de référence. On a donc là à l'origine une figure géométrique de l'idée d'absence de formes distinctives, de l'idée de référence universelle neutre permettant de situer évènements* et phénomènes*.

Par extension, on utilise le mot "normal" selon deux sens: l'un signifiant ce qui sert de règle, de modèle, de point de comparaison, l'autre, qui est abusivement devenu le sens courant , pour exprimer l'absence de tout caractère exceptionnel , la conformité au type le plus courant , le plus habituel.

Terme riche et équivoque, que sous tend le sentiment que la généralité observable est le signe d'une réalité essentielle. Opposant la normalité comme le plus probable à l'exceptionnel comme le moins probable, on voit la notion de normal s'identifier à la catégorie générale de vide, à travers les conceptions de la théorie de l'information*. Le normal, c'est le vide d'exceptionnel, le vide de formes, le vide d'information.

La théorie quantique réalise pleinement cette conception en appelant vide, l'état normal de tout système physique, l'état où la réalisation du minimum d'énergie possible (état fondamental), signifie l'absence d'excitations (phénomènes exceptionnels). On peut dire que la théorie quantique, par une pratique qui pourrait paraître spécifique, illumine pleinement la notion générale de vide*.

Les concepts de normal et de fond* sont étroitement liés.

NOUMENE

NOYAU ATOMIQUE

NUCLEONS

Nom général donné aux particules constituantes des noyaux atomiques*, le proton* et le neutron*.

NUCLEOSOME

Un nucleosome est un octamère d'histones* autour duquel s'enroule une molécule d'ADN*. Les chromosomes* sont constitués de nucléosomes.

NUCLEOTIDES (Cf. Acide nucléique*)

NUMERIQUE

Qualifie une représentation de l'information par un nombre fini de valeurs discrètes. Se dit, par opposition à analogique*, de la représentation de données ou de grandeurs physiques au moyen de caractères - des chiffres généralement - et aussi des systèmes, dispositifs ou procédés employant ce mode de représentation discrète.

Les progrès des technologies de l'information et de la communication reposent pour l'essentiel sur une innovation technique fondamentale : la numérisation. Dans les systèmes traditionnels - dits

analogiques - les signaux (radio, télévisions, etc.) sont véhiculés sous la forme d'ondes électriques continues. Avec la numérisation, ces signaux sont codés comme des suites de nombres, eux-mêmes souvent représentés en système binaire par des groupes de 0 et de 1. Le signal se compose alors d'un ensemble discontinu de nombres : il est devenu un fichier de nature informatique.

La conversion analogique-numérique est une opération qui permet de convertir un signal analogique en un signal numérique représentant les mêmes informations.

Les techniques de numérisation ne se bornent pas à changer le support matériel de l'information, elles introduisent dans la manipulation de l'information la multiplicité, la métamorphose, le mouvement et le changement continu. Elles ouvrent la possibilité de suivre les évolutions du monde en temps réel et de multiplier les représentations du monde à travers des modèles* de simulation*. Les matériaux et les outils numériques sont essentiellement d'ordre symbolique et langagier, ce qui accentue encore cet aspect de notre rapport au monde.

NUMERO ATOMIQUE

OBJECTIVATION

Acte d'attribution à un objet, au titre d'attribut* ou de propriété*, d'un phénomène ou d'une observation. Objectiver, c'est affirmer qu'une propriété appartient en propre à un objet sans nécessairement pouvoir observer cet objet, et donc lui appartient en l'absence de toute observation. L'objectivation nous amène donc à employer des termes par lesquels nous référons à des objets munis d'attributs. La Mécanique Quantique* est une description de la nature impossible sans observateur car elle limite par principe nos connaissances aux résultats des observations et ne possède pas de discours sur le monde microphysique en lui même. Mais cette description reste néanmoins objective vu le caractère idéalisé de l'observateur. Cela fait pourtant dire à certains qu'il s'agit là d'une objectivité faible.

OBJECTIVITE

C'est la qualité de tout ce qui existe indépendamment de toute connaissance ou idée, ou plus opérationnellement de ce qui est valable pour tout observateur*. C'est alors essentiellement ce qui ne dépend pas des perspectives particulières sous lesquelles il est considéré.

Objectif s'oppose à subjectif*, qui désigne ce qui est propre à un sujet épistémique. Ainsi l'objectif s'oppose aux apparences* sensibles.

Les lois de la nature* sont objectives, la formulation que nous en donnons est subjective.

L'objectif c'est ce qui satisfait à la communication intersubjective*. On peut dire que l'objectivité scientifique s'installe à travers l'existence d'un langage commun abstrait de communication, comme les mathématiques*. La révolution galiléenne en sciences est d'avoir mathématisé la nature, c'est de lui avoir donné un caractère idéalisé et par là même objectif. C'est grâce au langage mathématique que l'on substitue aux qualités sensibles éprouvées sur les corps eux-mêmes, ce sont les qualités et les propriétés attribuées aux corps qui permettent le développement de la physique.

En physique l'objectivité est reformulée en termes de la théorie des groupes* : ce qui est objectif est ce qui est invariant par rapport au groupe des transformations des cadres de référence, ou pour citer Hermann Weyl* : « l'objectivité signifie l'invariance par rapport au groupe de automorphismes* de l'espace-temps ».

Le débat philosophique sur l'objectivité a toujours été vif dans la pensée occidentale, de Descartes* à Kant* en passant par Hume*. C'est l'enjeu de l'opposition entre rationalistes*, réalistes* et empiristes*. Au XX^e siècle ce débat continue. Fortement influencés par le phénoménalisme* d'Ernst Mach*, les positivistes logiques* du Cercle de Vienne* ont essayé de fonder la science sur des bases objectives en utilisant l'analyse logique, mais cette tentative a échoué.

Husserl* a fort bien analysé la façon dont l'objectivation géométrique et physique du monde a détruit les essences morphologiques vagues de la manifestation sensible pour en faire de simples apparences* à étudier psychologiquement.

Dans *Crise des Sciences européennes...* il reprend sa thèse récurrente que le caractère fondamental de l'axiomatique euclidienne a été de permettre d'*anticiper a priori* "par une méthode systématique *a priori* omnienglobante" sur la construction et les propriétés de toutes les entités qui existent *idealiter* dans un univers rationnel infini. Mais ce gain théorique possède un prix très élevé. Car la géométrie n'a pu devenir ce qu'elle est que parce qu'elle s'est "arrachée" au "flux héraclitéen" des formes sensibles et des données changeantes de l'expérience préscientifique, que parce qu'elle a forclus l'univers des "essences morphologiques vagues" et des formes anexactes proto-géométriques dans leur rapport d'adéquation aux concepts descriptifs de la langue naturelle.

Or, à partir de Galilée, la physique se caractérise selon Husserl par l'idée "encore plus inouïe" que les mathématiques sont adéquates au réel et donc qu'une science "posant que la totalité infinie de l'étant en général est en soi une unitotalité rationnelle dominable sans reste par une méthode systématique" est une science possible. Mais cette Idée possède, comme celle de la géométrie, son refoulé. D'abord, comme la géométrie, celui "du flux héraclitéen des morphologies sensibles remplissant la spatialité intuitive" Ensuite celui des qualités sensibles à travers lesquelles les phénomènes se trouvent concrètement donnés dans leur manifestation. Selon Husserl, ces morphologies protogéométriques et ces qualités secondes ne sont pas mathématisables directement et "l'évidence galiléenne" consiste à postuler que, comme indices d'objectivité, elles le sont *indirectement* et peuvent être objectivées en formes spatio-temporelles : champs, etc.

Mais, du coup, en tant que constitutives de l'apparaître, elles deviennent *ipso facto* subjectives-relatives. Elles ne sont plus qu'apparences* et ne possèdent plus comme seule dignité ontologique que celle, résiduelle, d'indices d'une objectivité sous-jacente. D'où la disjonction entre apparaître phénoménologique et être physique ainsi que la substitution, au monde pré-scientifique donné dans l'intuition, d'une substraction théorique et, à la "légalité concrète universelle" de la nature, d'une légalité mathématique et d'un universum de causalité déductive.

C'est sur cette base que Husserl dénonce un "objectivisme" physicaliste qui en arrive à ce paradoxe de rendre incompréhensible la physique elle-même. Doit-on soutenir que l'apparaître perçu n'est que l'indice d'une vérité physique transcendante, qu'il n'est que pure apparence subjective, "simulacre", "image-portrait", "signe" de la "vraie" chose physique .

L'objectivité de l'objet d'expérience se constituant au détriment de la manifestation, elle ne saurait, même mathématisée, être prise pour la cause du phénomène dans son apparaître. Il faut par conséquent corrélérer le *X* mathématiquement déterminé ("l'être physiquement vrai") à l'apparaître se donnant intuitivement comme "chose même" dans les déterminations sensibles du perçu.

Certains ont voulu distinguer une objectivité forte d'une objectivité faible lorsque la description des phénomènes fait intervenir un observateur* comme en mécanique quantique*.

L'objectivité au sens épistémique n'est pas synonyme de vérité*, quoi que l'usage ait tendance à les confondre. Elle est davantage un "indice de confiance" ou de "qualité" des connaissances et des représentations. En effet, une théorie scientifique peut être objective

sans être vraie. C'est le cas, par exemple, de la théorie du Phlogistique (chimie), de la théorie de la Transmission des caractères acquis (biologie), de la théorie de l'Éther (physique). Il s'agissait de théories objectives au sens où elles s'appuyaient sur un ensemble de faits d'observation et/ou d'expériences, étaient consistantes avec les connaissances théoriques de leur temps, et jouissaient de la reconnaissance de la communauté scientifique.

L'objectivité est l'idéal de la science contemporaine mais on peut se demander s'il est véritablement atteint.

OBJET

OBJET CLASSIQUE

OBJET INDUSTRIEL

OBJET INTENTIONNEL

OBJET PHYSIQUE

OBJET QUANTIQUE

Le terme objet quantique a pour fonction de souligner la crise d'identité de la notion d'objet en microphysique*. Placé dans une boîte noire* par la Mécanique Quantique, l'objet quantique n'est pas donné d'avance avec ses propriétés et la permanence de ces propriétés n'est pas assurée. On continue à dénommer électron, atome, ..., vide, un objet idéal qui serait le responsable des manifestations expérimentales, tout en sachant pertinemment que ces objets ont des propriétés ondulatoires que l'on ne sait pas qualifier directement (Cf. Onde de de Broglie*). On peut chercher à traduire cette situation dans le langage en désignant l'objet quantique par un mot spécifique, quanton, par exemple.

L'objet quantique est caractérisé par son état* qui permet de calculer les probabilités de toutes les observables*

Pendant longtemps les situations expérimentales où la mécanique quantique était impliquée concernaient de très grands ensembles d'objets quantiques. Dans ce type de situation il n'y a aucune difficulté à utiliser les résultats probabilistes des calculs quantiques.

A partir des années 70 les physiciens ont inventé des méthodes pour manipuler et observer un seul électron ou un seul ion conservé pendant des heures à l'aide de champs électriques ou magnétiques qui le maintiennent loin de toute paroi dans une enceinte vide.

Puis est apparue la microscopie de champ proche* qui a permis d'observer et de manipuler des atomes individuels déposés sur une surface. A la même époque les progrès conceptuels et expérimentaux de l'optique quantique* ont permis de produire et de manipuler les photons* un à un.

Le prix Nobel de physique 2012 a été attribué à Serge Haroche et David Wineland pour le développement de méthodes expérimentales révolutionnaires permettant la mesure et la manipulation de systèmes quantiques individuels. Wineland utilise des champs électriques pour piéger des ions individuels dont il étudie le comportement au moyen de faisceaux laser. Haroche piège des photons microondes dans une cavité et utilise des atomes de rubidium dans un état de Rydberg* pour les détecter par une mesure quantique non destructive* qui permet de voir le photon et de le revoir. Il a suivi la vie et la mort d'un photon individuel, d'un état quantique à un état classique (décohérence*).

Le piègeage d'objets quantiques individuels a obligé les physiciens à se reposer la question soulevée par Einstein de l'application de la M.Q. appliquée à un objet unique. En particulier on peut se poser là le problème des sauts quantiques*. L'existence de ces sauts qui implique une évolution discontinue de l'objet avait été violemment contestée par beaucoup de physiciens dont Schrödinger. Au milieu des années 1980 on a pu observer les sauts quantiques sur un ion unique piégé dont la fluorescence varie brutalement. Cette observation a beaucoup frappé les physiciens.

L'objet quantique change progressivement de statut. D'objet abstrait tenu pour responsable d'effets observables macroscopiques il devient le sujet de sa propre histoire, observable expérimentalement.

La notion d'objet quantique s'élargit parallèlement en sortant du domaine microphysique pour envahir le nanomonde*. On a obtenu des interférences avec un objet quantique aussi gros que le fullène (C_{60}) et un condensat de Bose-Einstein* gazeux de quelques millions d'atomes a un comportement conforme à la statistique quantique*. On observe un comportement quantique pour des objets de plus en plus gros. Où se situe la frontière entre quantique et classique ?. Y'a-t-il une fonction d'onde de l'univers ?

OBJET UNIQUE

OBSERVABLE. Observabilité.

L'observabilité expérimentale d'un objet ou d'une propriété en fait un observable d'une théorie scientifique. L'observation est la manifestation à l'un des sens par lesquels l'homme perçoit le monde, directement ou indirectement, par l'intermédiaire d'appareils ad hoc. La dichotomie observable-nonobservable se voudrait un concept essentiel de l'empirisme* et du positivisme*. On peut distinguer observabilité (et non-observabilité) de fait ou par principe. L'inobservabilité par principe est un énoncé qui s'inscrit dans une théorie ou une loi. Ainsi la Théorie de la Relativité indique que l'on ne peut observer par principe un signal se propageant à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide. L'observabilité de fait ne peut malheureusement pas être décidée sur la base de l'observation, car ce qui est observable par principe n'est pas toujours observé. L'observabilité de fait dépend elle aussi d'une théorie, car toute observation ne prend un sens qu'à travers une conceptualisation (Thèse de Duhem-Quine*). Si l'on se base uniquement sur les techniques d'observation, l'observabilité et l'inobservabilité n'ont pas de frontière bien précise.

On peut envisager la science comme une théorie des observables, toutefois l'ensemble des entités qu'elle suppose dans sa représentation du monde réel*, ne saurait se réduire aux seuls observables. D'abord parce que parmi les observables certains ne sont que des effets d'autres entités qui seules sont considérées comme constituant le dernier aménagement du monde (c'est le cas par exemple de la couleur* ou de la chaleur*). Ensuite, parce que certaines entités dont on postule la réalité ne sont pas observables directement sinon au travers de certains de leurs effets (l'électron*, par exemple). Enfin parce que certaines entités n'ont d'existence qu'à l'intérieur d'une théorie* (cas de l'accélération ou du champ électromagnétique).

OBSERVABLE (en Mécanique Quantique)

Concept clé de la Mécanique Quantique dans la mesure où celle-ci repose avant tout sur une distinction entre un domaine microscopique (l'objet quantique*) et un domaine macroscopique auquel appartiennent les résultats des expériences (observations) effectuées sur l'objet quantique* microscopique. L'observable en Mécanique Quantique est une manifestation macroscopique de l'objet microscopique, dépendant de l'emploi d'un dispositif expérimental, véritable Janus microscopique-macroscopique. C'est le résultat d'une mesure*. Le fait essentiel est donc que l'observable n'est définie qu'à travers un instrument et n'a pas de sens avant l'intervention de cet instrument. L'observable n'est pas un attribut* de l'objet quantique seul, mais un résultat de l'interaction entre l'objet quantique et un appareillage. C'est une propriété* de l'objet quantique. Ceci ne signifie pas que l'objet quantique n'a pas d'attributs* propres (ex : masse, charge...). Mais il ne possède pas en propre, tout au moins en acte*, les propriétés observables que la Mécanique Quantique prétend formaliser. La Mécanique Quantique refoule les observables propres de l'objet quantique dans une boîte noire*. C'est la logique de la boîte noire qui fait de l'observable un signal de sortie et non pas un attribut.

Dans le formalisme de la mécanique quantique, l'observable est représentée par un opérateur dans un espace de Hilbert*. Cet opérateur peut être obtenu par une règle de correspondance avec les fonctions dynamique de la mécanique classique (quantification*), ou comme conséquence des propriétés de symétrie de l'espace temps macroscopique nécessaire à la formulation même de la mécanique quantique.

Alors que les variables dynamiques classiques correspondent à des observables, on n'a pas réussi à définir une observable correspondant au temps*. Il n'y a pas de quantification* du temps.

OBSERVABLES NON COMPATIBLES (en Mécanique Quantique)

Les observables* dont des valeurs précises peuvent être obtenues simultanément dans une même mesure*, sont dites observables compatibles. Dans le cas contraire, s'il faut avoir recours à des mesures* distinctes, on dit que les observables sont non-compatibles. Cette non-compatibilité, qui n'apparaît que par suite de la définition particulière de l'observable en Mécanique Quantique, ne signifie pas que les observables sont indépendantes. Bien au contraire, la non-compatibilité est profondément liée à la dépendance des observables

qui est au cœur du dualisme onde-corpuscule* et des relations d'incertitude de Heisenberg*.

Le fait majeur de la Mécanique Quantique est dans la prise en compte de cette dépendance des observables non-compatibles dans un formalisme unique, le formalisme vectoriel de l'espace de Hilbert. La non-compatibilité s'y exprime par la non-commutation* des opérateurs* correspondant aux observables.

C'est parce que le nombre de photons et l'intensité du champ électromagnétique sont des observables non-compatibles que le nombre de photons peut être nul sans entraîner l'absence du champ.

Tout le secret mystérieux du Vide Quantique se trouve là.

OBSERVATEUR

Dans le discours scientifique l'emploi du terme observateur ne signifie en rien l'intervention d'un être humain avec sa conscience*. On désigne par là un observateur idéal correspondant à un cadre de référence* ou à un acte de mesure*, un observateur abstrait garantissant toutes les conditions de l'objectivité*. De ce fait les faits invoqués par l'observateur sont essentiellement des faits construits, des faits dont l'objectivité* passe par l'emploi d'une théorie*. Le concept d'observateur signifie la plupart du temps, cadre de référence*, ce qui est particulièrement explicite en relativité*. En mécanique quantique l'observateur est ce qui ramène toutes les informations au cadre macroscopique.

OBSERVATEUR (en Mécanique Quantique)

A la différence de la plupart des théories physiques classiques la mécanique quantique fait explicitement intervenir dans sa formulation un agent extérieur à l'objet quantique* qu'elle nomme l'observateur*. Elle le fait à deux niveaux différents.

Un observateur humain intervient dans la constitution même de la mécanique quantique puisque celle ci se veut un modèle cybernétique* des entrées-sorties, formulé en terme d'état* représentant la connaissance de l'observateur*.

Un observateur physique (éventuellement mis en place par un observateur humain) apparaît tant au niveau de la préparation* qu'à celui de la mesure*. Mais cet observateur reste abstrait. C'est un passeur entre deux univers. On ne peut en particulier se poser la question de ce qui se passe pour deux observateurs différents. C'est le sens de la notion d'observable* en mécanique quantique.

Le rôle de l'observateur en mécanique quantique est purement technique et se trouve dénué de toute prétention métaphysique faisant appel à sa conscience.

OBSERVATEUR (en Relativité)

OBSERVATION

Acte de perception sensible du monde extérieur, finalisé et organisé, constituant le matériau primaire de la pensée scientifique. L'observation peut être directe (à l'aide des sens) ou indirecte (à l'aide d'instruments). Le problème essentiel posé par l'observation est de savoir, selon les cas, si elle se borne à constater et à enregistrer des propriétés présentes dans la Nature, ou si elle participe activement à la révélation de propriétés latentes ou même à la création de propriétés. L'observation est-elle objective et neutre ou bien intrusive, perturbatrice, révélatrice? Peut-on observer un système physique sans le perturber? Physique classique et physique quantique apportent à cette problématique des réponses souvent différentes, qui constituent une caractérisation de ces deux doctrines scientifiques.(Cf. Mesure en mécanique quantique*).

OBSERVATION CONJOINTE (en mécanique quantique)

OCCULTISME

Toute doctrine qui distingue des qualités* apparentes, visibles, de qualités* occultes, cachées. Cette distinction est variable selon les époques et les cultures. La distinction entre science et occultisme est souvent fragile, ce qui brouille le statut de l'occultisme comme savoir des qualités cachées. On associe en général les progrès de la science à des reculs de l'occultisme. Mais l'examen de la science y révèle de nombreuses qualités occultes, depuis le champ magnétique, les qualités potentielles de la mécanique et des probabilités, le potentiel quantique de Bohm*, l'état quantique*, ou le champ de jauge*. Les modèles cybernétiques* (boîte noire) ou le vide quantique* introduisent des domaines cachés. La psychanalyse est elle une forme d'occultisme ? Juger de l'occultisme du point de vue de la science est affaire délicate et dépend du contexte culturel. Mais il y'a beaucoup d'arguments qui

permettent de considérer comme erronées des science occultes telles l'alchimie* ou l'astrologie* ; notre connaissance du champ magnétique exclut tous les pouvoirs magnétiques attribués par l'occultisme. Et cependant des physiciens parlent de réel voilé à propos de la mécanique quantique. René Thom dit que la Science est une magie qui a réussi.

Il faut bien prendre conscience de cette dialectique subtile de ce qui est visible et de ce qui reste caché. Vision et occultation constituent le programme de toute démarche de connaissance véritable. Pour l'Hermétisme* le couple dynamique Révélation-Occultation est la clef de tout équilibre entre la vie intérieure et le connaissance extérieure, la clef de la véritable spiritualité. Or, dans sa visée dévoilante, tout savoir constitué ou en train de l'être, ne connaît le recèlement que sous la forme de ce qu'il ne sait pas encore, sous celle du manque infligé à la connaissance ; il est donc dans sa logique de pallier ce manque par son propre accroissement, dépassement, par l'amplification de son champ, quitte à s'égarer ainsi dans la trop grande clarté des savoirs. Si tout acte de dévoilement contribue à instaurer un « savoir », à le restituer au monde qui, pour des raisons diverses s'en était démarqué, ou l'avait refoulé ; encore faut-il être prêt à admettre que tout recèlement n'est pas forcément, travestissement du vrai, manœuvre insidieuse d'un savoir pour conserver un pouvoir : ce peut être un ombrement ; car s'il est une sagesse inhérente à la pensée hermétique* et alchimique*, c'est d'avoir compris que tout savoir qui veut rester sagesse et ne pas contribuer à alimenter seulement les bûchers où se consomment et se consomment les formes constamment changeantes de l'acte de connaître, doit être réocculté. Le propre de la science, c'est de découvrir dans chaque corps le rapport qui existe entre le manifesté et le caché. Occulter l'apparent, faire apparaître l'occulté.

ONDE

Variation par perturbation de l'état d'un milieu, qui se propage en transportant de l'énergie, sans transporter de matière. L'énergie se propage par contact entre particules voisines. Le phénomène d'onde est si vaste et si varié que l'on ne peut en donner une caractéristique générale plus précise. Phénomène bien connu à la surface d'un bassin rempli d'eau ou en acoustique où les ondes propagent le son. La chaleur se propage par ondes. La notion d'onde joue un rôle primordial dans l'ontologie de la physique* représentant le type même

d'objet délocalisé en opposition à la ponctualité de la particule (Cf. Dualisme onde-corpuscule*).

Lorsqu'un phénomène oscillatoire* met en mouvement le milieu environnant, l'oscillation se propage et donne naissance à un phénomène périodique dans l'espace et dans le temps, que l'on appelle une onde oscillante. Le phénomène mathématique des ondes se retrouve en électromagnétisme et en optique. Les ondes radio et les ondes lumineuses expriment la propagation du champ électromagnétique, sans que l'on puisse définir un milieu (éther* ?) qui assure cette propagation.

Les différentes phases* du phénomène oscillatoire se reproduisent dans l'espace et l'on appelle longueur d'onde la plus petite distance entre deux points de l'espace où les phases sont identiques. Cette longueur d'onde est liée à la vitesse de propagation de la phase par l'intervention de la fréquence du phénomène oscillatoire dans la formule simple $\lambda\omega = v$.

L'onde est le siège en tous les points de l'espace de vibrations de même fréquence en phase deux à deux. Mais les amplitudes peuvent être différentes aux différents points de l'espace. On a alors un phénomène ondulatoire où les maxima et les minima d'amplitudes se produisent à des points fixes, ce sont des ondes stationnaires*, que l'on distingue des ondes progressives où les amplitudes sont les mêmes en tout point.

Les ondes peuvent se réfléchir sur un obstacle, se réfracter à la surface de séparation de deux milieux, se diffuser* dans un milieu dispersé, ou se diffracter* sur les bords d'un obstacle ou par interaction avec un milieu périodique (cristal*, aile de papillon). Elle donnent lieu aux magnifiques phénomènes d'interférence*.

Les ondes sont un des phénomènes caractéristiques des systèmes distribués* et l'équation vérifiée par les ondes est la célèbre équation trouvée par d'Alembert*. C'est une équation linéaire, au sens où ses solutions satisfont au principe de superposition*. Dans le cas contraire, il existe des ondes qui ne satisfont pas au principe de superposition et sont dites ondes non linéaires* (Cf. Système non linéaire*).

Lorsque le milieu où se propagent les ondes contient des sources d'énergie (milieu actif) on peut observer des autoondulations*.

ONDE ELECTROMAGNETIQUE

ONDELETTE**ONDE NONLINEAIRE****ONDE PILOTE**

La théorie de l'onde pilote est une théorie développée par Louis de Broglie dans les années 26---27 pour donner une interprétation de la dualité onde-corpuscule*. Elle envisage des ondes non-linéaires* possédant des singularités. La particule semble alors suivre l'onde qui lui sert de guide. Cette théorie n'a pas abouti.

ONDE STATIONNAIRE

Une onde stationnaire est une onde où les amplitudes des vibrations ne dépendent pas du temps, mais seulement de la position dans l'espace. En chaque point l'amplitude est constante. En particulier les minima d'amplitude (nœuds) et les maxima d'amplitude (ventres) sont à des endroits fixes.

C'est un phénomène périodique dans l'espace et le temps avec séparation de ces deux variables.

Ce sont des vibrations dans un système vibratoire distribué avec une succession caractéristique de minima et de maxima d'amplitude.

Ce type d'onde apparaît lorsqu'une onde est contrainte par des obstacles bilatéraux et peut s'interpréter comme l'interférence* d'une onde avec l'onde réfléchi sur les obstacles. C'est le cas d'une corde fixée à un mur que l'on fait vibrer. C'est le cas des cordes frappées (piano, guitare) ou des colonnes d'air en vibration libre (flute) d'un instrument de musique.

L'onde stationnaire est un état stationnaire* du système total constitué par le milieu qui vibre et les contraintes externes.

ONTOGENESE ET PHYLOGENESE**ONTOLOGIE**

Etude, discours ou connaissance de " l'être en tant qu'être" (Aristote) ou des choses en elles mêmes, indépendamment des aspects particuliers, des apparences ou des attributs. Ontologie et métaphysique* sont souvent confondus. Mais si la métaphysique est un discours dans l'absolu, l'ontologie se présente plutôt comme une démarche opposée à l'épistémologie*. L'ontologie s'intéresse à la

nature, à l'essence et au mode d'existence des choses*, bref à la structure de la réalité*, alors que l'épistémologie* est concernée par la connaissance* des choses. Elle se demande bien sûr quel rapport la structure de la réalité entretient avec la structure de la connaissance*.

On peut distinguer des caractères ontologiques* et des caractères épistémiques* d'un phénomène ou d'un objet. Caractères intrinsèques et caractères révélés à l'observation. Ontologie et épistémologie entretiennent des rapports subtils, sources de bien des confusions, comme c'est le cas dans l'étude des systèmes dynamiques* ou des systèmes quantiques*. Il n'est pas toujours aisé de distinguer ce qui relève de la nature des choses et ce qui dépend de nos stratégies d'observation*.

Toutes les théories physiques ont des fondements ontologiques, c'est à dire des présupposés sur la nature profonde des choses et leur statut de réalité: les constituants ultimes, la nature des propriétés, l'espace*, le temps*, la localité*, l'individualité*, la causalité*.....

Selon Philippe Descola il y a quatre types d'ontologie :

1- *L'animisme : continuité entre les intériorités des humains et celles des autres existants, avec différence dans les physicalités ;*

2- *le naturalisme moderne (né de la révolution scientifique du 17ème siècle, il a atteint sa forme achevée au XIXème siècle avec Darwin*, notamment): continuité entre les physicalités des humains et des non-humains, mais privilège de l'intériorité reconnu aux seuls humains ;*

3- *le totémisme : identité des intériorités et des physicalités de certains humains et de certains nonhumains*

. Selon Lévi-Strauss cette continuité physique, psychique et morale entre groupes humains et non-humains renvoie à des prototypes abstraits, entraînant des propriétés qui font qu'humains et non-humains appartiennent à la même classe, malgré les différences morphologiques. Le linguiste Carl Georg von Brandenstein, spécialiste des langues aborigènes d'Australie, indique que les noms d'espèces animales ne sont pas des noms d'espèces, mais des noms de propriétés (« le sautillant », « le guetteur », « le soyeux », etc .), qui servent aussi à désigner une espèce subsumant des propriétés partagées par des humains et des non-humains ;

4- *l'analogisme : discontinuité des intériorités et des physicalités. Dans une ontologie analogiste tout est singularité, il n' y a que des individus uniques, composés eux-mêmes d'instances multiples, en équilibre instable ; d'où la nécessité d'établir dans ce chaos des correspondances selon l'analogie (l'un des meilleurs exemple d'analogisme est la « Chaîne de l'Être » chère à Plotin* et aux néoplatoniciens*, qui servira de grande métaphore de l'intelligibilité du monde pendant tout le MoyenÂge*

et jusqu'aux 17ème et 18ème siècles – cf sur ce point le grand livre d'Arthur Lovejoy , The Great chain of Being, publié pour la première fois en 1936). Cette chaîne articule des maillons, depuis l'Etre parfait (cet Etre est identifié à Dieu par les Chrétiens) jusqu'aux êtres les plus humbles, avec une toute petite différence quasi imperceptible entre un maillon et le suivant ; d'où une impression de continuité (cf en Chine les 10.000 principes (êtres composant le monde) du Tao, organisés en réseaux de correspondances ; cf également dans Les Mots et les choses de Michel Foucault le chapitre La prose du monde, consacré à l'épistémè* de la Renaissance)*

: De ces 4 formules ou modes d'identification distribuant les propriétés des êtres du monde, un seul, le naturalisme moderne, dissocie nature et culture, humain et non-humain ; notre cosmologie, cas particulier parmi les formules permettant de penser le monde et d'agir sur lui, repose sur deux principes :

- les lois universelles de la nature, dont se distingue le monde humain, caractérisé par l'arbitraire, la convention, le libre-arbitre, l'invention, - les hommes, à leur tour, se distinguant entre eux par la différence des intériorités individuelles et collectives (cf les notions d'esprit d'un peuple [le Volksgeist] et de culture chez Herder et dans le romantisme allemand).

ONTOLOGIE FORMELLE

ONTOLOGIES DE LA PHYSIQUE

Une ontologie de la physique se doit de définir les termes du discours sur le monde, prendre position sur leur existence réelle et statuer sur le degré de vérité des affirmations les concernant.

"La Physique" d'Aristote est une ontologie de la physique. Cette ontologie constitue une métaphysique* et une philosophie naturelle*.

Malgré l'affirmation contraire du conventionnalisme* ou de l'instrumentalisme*, toute théorie physique possède une ontologie. Selon Kuhn* l'histoire de la physique raconte comment une ontologie chasse l'autre.

Toute ontologie de la physique doit se prononcer sur trois questions essentielles: les constituants fondamentaux de la Nature, l'espace-temps, la causalité.

En ce qui concerne les constituants fondamentaux de la Nature, différentes interrogations apparaissent entraînant des prises de position métaphysiques ou méthodologiques.

Y'a-t-il un seul ou de multiples constituants?

Ce qui existe est-il toujours actuel* ou bien faut-il donner aussi un statut à l'existence en puissance*?

Un constituant fondamental est-il défini ou indéfini? Une interprétation* ontologique de la Mécanique Quantique considère que le monde microphysique présente des entités dont la position* et le moment* ne sont pas définis en l'absence de mesure.

Le constituant fondamental est-il une substance*, un processus* ou un évènement*? Depuis Aristote et Platon la conception dominante a toujours été en faveur de la substance, comme fondement des phénomènes observables. Descartes a même été jusqu'à considérer l'étendue comme une substance. Descartes a prétendu voir une substance dans l'espace et l'étendue. On a pu considérer l'énergie comme une substance. La théorie atomistique de la matière marque l'apogée de cette conception substantialiste, battue en brèche par la "dématérialisation" à l'œuvre aujourd'hui dans la théorie des champs* et la mécanique quantique*. Et pourtant là aussi, le champ prend des allures de substance non matérielle. Substance d'autant plus étrange, qu'à la différence de la substance atomique dominée par l'impénétrabilité, elle est le règne véritable du mélange* qui se manifeste aussi bien dans les interférences*, l'holographie* que la superposition des états* en mécanique Quantique.

Trois conceptions de l'espace* viennent compléter les conceptions sur les constituants fondamentaux. La conception de l'espace comme réceptacle vide contenant les substances. La conception substantialiste* de l'espace, considéré comme une substance fondamentale. La conception relationnelle* de l'espace, considéré dans ce cas comme un système de relations entre objets.

Les conceptions de l'espace* et les conceptions du vide* sont profondément entremêlées.

L'ontologie du temps* manifeste les trois mêmes conceptions que l'ontologie de l'espace. Le temps est le cadre dans lequel le changement a lieu. Le temps est un système de relations entre les changements. Le temps est une substance.

Que l'espace et le temps aient en commun le même type de problèmes ontologiques fait apparaître comme tout à fait naturel la solidarité de leur statut dans la conception de l'espace-temps* des théories relativistes.

Les différentes conceptions de l'espace et du temps doivent aussi se prononcer sur des questions aussi fondamentales que de savoir si l'espace et le temps sont absolus ou relatifs, homogènes ou discontinus, isotropes ou anisotropes, et même s'ils sont uniques. Problématiques qu'ils partagent complètement avec celles qui naissent autour du vide*

Pour ce qui est du temps, il s'y trouve associé le difficile problème de l'irréversibilité*.

Dernière ontologie enfin, celle de la causalité*, c'est à dire du caractère de la raison des choses et des événements. Discussion souvent liée à tort au problème du déterminisme* ou de l'indéterminisme*, de la nécessité ou de la contingence. Par contre la causalité est impliquée dans le dilemme "action par contact-action à distance" qui se trouve le témoin de nombreuses péripéties dont la polémique sur la localité* et la non localité* en Mécanique Quantique n'est que le dernier épisode.

ONTOLOGIQUE (Caractère) (Cf. Epistémique* - Caractère))

Le caractère ontologique est un concept métaphysique de la chose en soi, par opposition au caractère épistémique* de la connaissance de la chose. C'est une grave erreur de mélanger ces deux types de discours. Néanmoins cette confusion est fréquente, car bien souvent on donne un caractère ontologique, à un discours purement épistémique. La littérature sur la conscience* offre de nombreux exemples de cette confusion des catégories.

En physique quantique la distinction est essentielle, mais souvent maltraitée. Les fameuses discussions entre Bohr* et Einstein* en sont un exemple. Les arguments d'Einstein étaient de type ontologique, c.a.d. qu'il défendait un point de vue indépendant de l'observateur ou de la mesure. Les arguments de Bohr étaient de type épistémique, car ils étaient focalisés sur la connaissance et les conclusions que l'on pouvait tirer des phénomènes quantiques observés. Comme ni l'un ni l'autre ne rendait explicite ses points de vue de base, ce fut un dialogue de sourds.

Les relations d'incertitude* ou d'indétermination* de Heisenberg* appartiennent au domaine épistémique. Ce sont des limitations de notre connaissance des objets quantiques, et certainement pas un quelconque indéterminisme de ces objets.

OPERATEUR

Objet mathématique définissant une opération agissant sur un autre objet mathématique. Cette démarche symbolique revient à distinguer l'opération de l'objet sur lequel on opère. On peut ainsi

considérer l'opérateur de multiplication par un nombre, l'opérateur de rotation, l'opérateur de dérivation d'une fonction....La mathématique développe des théories pour les opérateurs tout comme elle en construit pour les nombres, en introduisant des lois internes de composition et des structures algébriques* pour ces objets particuliers.

En particulier l'opérateur est une représentation mathématique d'une opération sur les vecteurs d'un espace vectoriel. Ainsi la rotation ou la dérivation d'un vecteur sont des opérateurs. Ce sont des opérateurs linéaires car l'action de l'opérateur sur le vecteur multiplié par un nombre équivaut à multiplier par ce nombre l'action de l'opérateur sur le vecteur. L'étude des espaces vectoriels discrets et des opérateurs linéaires constitue l'algèbre linéaire. Les opérateurs linéaires sont représentables dans les bases de l'espace vectoriel par des tableaux de nombres appelés matrices*.

En M.Q. les observables* sont représentées non pas par des nombres mais par des opérateurs linéaires. Le fait que l'action successive de deux opérateurs puissent dépendre de l'ordre dans lequel ils agissent (non-commutation des opérateurs) joue un rôle central dans la théorie en définissant des observables non-compatibles*. Les opérateurs de la M.Q. agissent sur des fonctions de carré intégrable appartenant à un espace de Hilbert*.

OPERATEUR DENSITE (Cf. Matrice densité*)

OPERATIONNALISME

Tentative pour identifier le sens des mots scientifiques avec les opérations employées pour mesurer et tester. Terminologie introduite par P.W. Bridgman (1927), qui voulait que les concepts théoriques soient identifiés avec les opérations utilisées pour les mesurer.

L'opérationnalisme est une démarche qui se trouve à l'arrière plan de bien des pratiques théoriques scientifiques contemporaines, comme le béhaviorisme* psychologique, la théorie des systèmes*, la relativité restreinte* et la mécanique quantique*.

Dans cette dernière, le vecteur d'état* n'est pas défini de manière opérationnelle, seules le sont les probabilités qui en sont déduites.

OPTIQUE

Il faut reconnaître que le physicien lui même est souvent mal à l'aise devant la diversité des langages de l'optique. La lumière est

l'objet de différents discours qui se développent souvent de manière autonome avec un passage problématique de l'un à l'autre. Il n'y a pas une Optique, mais de nombreuses Optiques. L'optique géométrique*, l'optique ondulatoire* (électromagnétique), l'optique de Fourier*, l'optique statistique, l'optique informationnelle, l'optique semi classique (lumière classique agissant sur la matière quantifiée), l'optique quantique* (lumière quantifiée), sans parler de l'optique non linéaire* ou de l'optique cohérente des lasers. Et pour couronner le tout une optique physiologique*.

Selon ses besoins le physicien adopte le langage propre à chacun de ces territoires, et à du mal à passer d'un langage à l'autre. Le problème de la couleur* vient taquiner tous ces territoires à la fois, et si certains formalismes mathématiques sont sans ambiguïté, les concepts ont souvent du mal à se raccorder les uns aux autres.

Le plus célèbre de ces raccords problématiques se trouve dans la fameuse relation de Planck*, fondant la théorie quantique en reliant l'énergie à la fréquence $E = h \nu$. Relation phénoménologique dont le sens physique profond échappe, même si elle fonde la théorie du photon*, en affirmant le mystérieux dualisme onde corpuscule*. Les discours reliant énergie et fréquence sont toujours délicats et contiennent des pièges où tombent la plupart de nos contemporains. Ainsi dans un document rédigé par un cardiologue pratiquant l'ablation de flutter par radiofréquences et que l'on fait signer au patient, on décrit l'intervention comme l'application d'une énergie appelée radiofréquence.

OPTIQUE ATOMIQUE

OPTIQUE DE FOURIER

Partie de l'optique où la transformation des champs lumineux par des systèmes optiques est étudiée à l'aide de la représentation de Fourier* et de la théorie des filtres* linéaires. On y exploite l'analogie entre les problèmes de radioélectronique et de traitement du signal*, où l'on considère la transformation de signaux dépendant du temps, d'une part, et ceux de l'optique où l'on considère la transformation de champs lumineux fonctions des coordonnées d'espace. Les signaux optiques sont considérés comme la superposition d'ondes planes tout comme dans le principe de Huyghens-Fresnel* on considère l'onde comme superposition d'ondes sphériques.

La figure de diffraction* par un objet, à l'infini ou dans le plan focal d'une lentille, est la transformée de Fourier* de cet objet.

OPTIQUE GEOMETRIQUE

Optique des phénomènes lumineux descriptibles uniquement à l'aide d'une propagation rectiligne de la lumière. Ces phénomènes sont essentiellement la réflexion et la réfraction, qui se produisent à la surface de séparation de deux milieux différents. On peut ainsi décrire le passage de la lumière à travers des lentilles ou des prismes. La réfraction met en jeu une loi où apparaissent des indices de réfraction caractéristiques des milieux en présence.

OPTIQUE NONLINEAIRE

Chapitre de l'optique physique* étudiant la propagation de puissants faisceaux de lumière dans les solides, les liquides et les gaz et leur interaction avec ceux-ci. Avec l'apparition du laser* l'optique a eu à sa disposition une source de lumière cohérente de grande intensité. Dans un tel champ lumineux apparaissent des effets optiques tout à fait nouveaux et le caractère des phénomènes connus est profondément modifié. Le trait commun à tous ces phénomènes est leur dépendance à l'intensité de la lumière. Un champ lumineux intense modifie les caractéristiques optiques des milieux (indice de réfraction et coefficient d'absorption). C'est là l'origine du terme optique non linéaire : si les caractéristiques optiques d'un milieu deviennent dépendantes de l'intensité du champ électrique E de l'onde lumineuse, la polarisation du milieu dépend de façon non linéaire de E . L'optique non linéaire a beaucoup de traits communs avec la théorie des vibrations non linéaires, puisque l'interaction de la lumière avec un milieu met en jeu la polarisation de ce milieu avec des vibrations des électrons attachés aux atomes ou aux molécules, vibrations qui deviennent non linéaires (anharmoniques) sous l'effet d'un champ lumineux puissant.

L'optique ordinaire avec des lumières de faible intensité est dite optique linéaire. Dans cette optique, avant laser, l'interaction d'un milieu avec la lumière dépend de la longueur d'onde et de la polarisation. L'intensité ne joue aucun rôle dans ces phénomènes. Les propriétés optiques telles que l'indice de réfraction et le coefficient d'absorption ne dépendent pas de l'intensité de la lumière. Le principe de superposition* s'applique : si deux champs peuvent se propager dans le milieu, alors il en est de même de toute combinaison linéaire de ces champs. Le passage à travers le milieu ne modifie pas la fréquence de la lumière. La lumière n'interagit pas avec la lumière ; on ne contrôle pas la lumière avec de la lumière.

Dans l'optique non linéaire, à fortes intensités lumineuses, l'indice de réfraction, soit la vitesse de la lumière dans le milieu, changent avec l'intensité. Le principe de superposition ne s'applique

plus. La lumière peut voir sa fréquence modifiée par passage à travers un milieu. La lumière peut contrôler la lumière : les photons* interagissent

La linéarité ou la non linéarité est une propriété du milieu à travers lequel passe la lumière, plutôt qu'une propriété de la lumière elle-même. Le comportement non linéaire ne se manifeste pas dans l'espace vide. La lumière interagit avec la lumière à travers un milieu matériel. La présence d'un champ optique modifie les propriétés du milieu, qui à son tour, modifie le champ original ou un autre champ optique.

La célébration en l'année 2011 du cinquantenaire de la naissance de ce domaine est associée à la parution en 1961 dans la *Physical Review Letters* par Franken et Ward d'un article annonçant le doublement de fréquence d'un laser, démontrant ainsi la possibilité de convertir une partie de la puissance d'un laser du spectre visible au proche ultra-violet, tout en conservant à ce deuxième rayonnement les caractéristiques de cohérence d'un nouveau faisceau laser.

Ce doublement de fréquence peut s'expliquer comme suit. La polarisation se propage avec le champ qui la crée sous forme d'une onde de polarisation. Si la polarisation dépend de manière non linéaire du champ, on a une onde de polarisation non linéaire qui oscille avec une fréquence double de celle du champ. Cette onde de polarisation non linéaire agit comme une nano antenne et émet un champ électromagnétique à fréquence double. Dû à un accord de phase entre toutes les nano antennes ce champ de la seconde harmonique se propage essentiellement dans la direction de l'onde de polarisation.

Simon Diner

L'expérience de 1961 a eu une importance décisive en ce qu'elle fut la première à mettre en évidence un véritable changement de fréquence par passage conversion de l'énergie d'un laser d'un domaine du spectre optique à un autre. On peut parler ici plus simplement d'un changement de « couleur », ici le passage du rouge de l'émission d'un laser à rubis au bleu profond du proche ultra-violet, grâce à une conversion directe de lumière en lumière, ce qui constituait une véritable première, à vrai dire non réalisable sans la puissance incidente permise par la mise en œuvre d'un laser. Il est néanmoins très remarquable que cette expérience ait eu lieu seulement un an après l'invention du laser, grâce à l'utilisation pionnière de la première source laser, à savoir un laser à rubis en régime

impulsionnel, dont l'invention et la mise au point sont l'œuvre de Theodore Maiman de la société Hughes Aircraft annoncée en 1960.

L'expérience pionnière de Franken et Ward, réalisée dans un cristal de quartz, constituait une avancée tout à fait remarquable, reposant sur un effet nouveau, appelé ultérieurement génération de second-harmonique, dont il n'existait aucun précédent dans le domaine optique. En effet, alors qu'il est relativement aisé de doubler la fréquence d'une onde de basse fréquence (basse étant ici à entendre en un sens relatif par rapport au domaine optique qui correspond à des fréquences de l'ordre de 10^{14} à 10^{15} Hz dans la partie visible du spectre), par exemple en mettant en œuvre dans un circuit radioélectrique un élément dit « non-linéaire », une telle opération ne peut être menée de la même façon dans le domaine des fréquences beaucoup plus élevées du spectre optique. Les éléments linéaires ou non-linéaires associés aux circuits électroniques ou radio présentent des fréquences de coupure, associées à leur bande passante limitée, qui ne leur permettent pas de « suivre » les oscillations beaucoup plus rapides du champ optique. C'est ainsi que les circuits électroniques les plus rapides présentent des coupures à des fréquences de l'ordre du GigaHertz (10^9 Hertz). La raison profonde en est que les phénomènes de transport d'électrons associés aux courants de l'électronique impliquent des déplacements de masse sur des distances significatives, en l'occurrence des électrons dont la masse n'est pas négligeable et se trouve de plus « alourdie » par l'interaction avec les atomes du réseau du milieu matériel environnant, qu'il s'agisse d'un conducteur et a fortiori d'un semi-conducteur. Il en résulte une inertie, c'est-à-dire un temps de retard¹ vis-à-vis des sollicitations de la source qui finit par aboutir à une véritable « transparence » à l'égard de celle-ci quand la fréquence des sollicitations de la source devient trop grande et ne permet plus aux électrons de « suivre ». Il n'est donc pas possible d'atteindre les fréquences de l'optique en recourant à l'arsenal par ailleurs bien éprouvé des effets physiques de transport électronique qui triomphent aux plus basses fréquences de l'électronique et des ondes radioélectriques. Dit autrement, seule l'optique est apte à traiter le signal optique, les électrons et la matière n'intervenant ici que comme médiateurs relativement « discrets » d'une interaction à caractère essentiellement photonique (e.g. photon(s)-photon(s)), dans des conditions au demeurant assez particulières de nature à limiter les effets d'inertie associés au transport d'électron.

De façon générale, ces effets ont trait à une classe générale de phénomènes mixtes (optiques comme matériels) regroupés sous le terme d'effets de polarisation électronique, ce qui les différencie des effets de transport associés à des courants. Dans un tel contexte de polarisation, les électrons associés aux atomes et aux molécules ne participent pas à un courant au sens d'un écoulement de charge d'un point à un autre, avec tous les inconvénients associés à ce type de phénomènes en terme d'inertie déjà mentionnée, mais aussi de collisions et de pertes tout au long de leur parcours. Ils oscillent selon un mode périodique d' « aller-retour », sur une distance de l'ordre de l'atome, de la molécule ou de la liaison chimique auxquels ils appartiennent et où ils restent localisé. On qualifie alors le milieu de diélectrique par opposition aux milieux conducteurs. Un tel milieu est composé d'un ensemble plus ou moins organisé de véritables nano-antennes, successivement sollicitées par le champ optique et émettant à leur tour un rayonnement qui correspond à une interférence entre toutes les nano-sources excitées par le même rayonnement incident (un laser ou tout autre source optique telle qu'une lampe ou le soleil etc...). Le terme de nano-antenne est ici légitime dans la mesure où une antenne, à des échelles classiques, est un dispositif électronique (un conducteur métallique, en général un « fil » soumis à une excitation électronique stationnaire, c'est-à-dire parcouru par un courant électronique oscillant sous la sollicitation d'une source de courant, aboutissant à des oscillations électroniques au long du fil tout à fait analogue, à une autre échelle, aux oscillations des électrons dans les systèmes atomiques ou moléculaires. De telles antennes, quelle qu'en soit l'échelle, émettent en retour une onde selon un principe dont Maxwell et Hertz ont été les grands pionniers. Rendre compte de tels mécanismes d'interférence n'est pas une affaire très simple puisqu'il s'agit en réalité d'un effet spatio-temporel : les nano-sources émettent à mesure qu'elles sont polarisées par le rayonnement incident excitateur (ou polarisant) se propageant dans le milieu matériel, ce qui nécessite la prise en compte de cet effet de retard temporel à l'excitation auquel sont soumises les différentes nano-sources selon leur position dans l'espace.

En revenant à l'effet générique de la polarisation de la nano-antenne (atome, molécule, ou liaison chimique, en tout cas entité relativement indépendante et isolable du milieu diélectrique qu'on peut considérer comme un nano-relais pour le champ excitateur) constituant le brique de base du matériau, on conçoit que cette polarisation dépendant du champ excitateur puisse s'exprimer de façon générale comme une fonction mathématique de ce champ (de

vecteur à vecteur). Lorsqu'on développe une telle fonction au premier ordre (ce qui revient à faire l'hypothèse que cette fonction est en réalité une relation de proportionnalité entre le champ excitateur et le déplacement des électrons au sein de l'entité microscopique de base, on se situe alors dans le domaine de l'optique linéaire. Dans le cas d'un rayonnement laser, l'intensité du champ polarisant nécessite un développement à des ordres supérieurs, qui sont successivement quadratique et cubique, voire même au-delà si nécessaire. On parle donc dans ces différents contextes respectivement d'optique non-linéaire ou de phénomènes quadratiques, cubiques etc... Plus généralement, on parle d'effet non-linéaire d'ordre n lorsque la polarisation induite résulte d'une interaction non-linéaire avec n champs incidents, ces champs pouvant être soit externes dans le cas de rayonnements lasers incidents, soit engendrés au sein même du matériau par le même effet non-linéaire ou un autre. Le cas des effets quadratiques, dont le plus connu est la génération de second harmonique, ne se limite toutefois pas à celui-ci et appartient à la classe plus large des effets dits de « mélange à trois ondes ». En effet, on inclue dans ce décompte des ondes interagissant non seulement les ondes incidentes (par exemple le rayonnement fondamental compté deux fois dans la génération de second harmonique) mais aussi le rayonnement émis par l'antenne non-linéaire ou le milieu (qui est le rayonnement harmonique à la fréquence double de celle du rayonnement fondamental dans le cas de la génération de second harmonique). Dans le cas d'un effet non-linéaire associé au terme cubique dans le développement, on parle de mélange à quatre ondes et plus généralement de mélange à n -ondes dans le cas d'un effet non-linéaire d'ordre $n-1$. Parmi les effets quadratiques ou de mélange à trois ondes, les plus importants sont la somme et la différence de fréquences, la modulation électro-optique déjà mentionnée au début de l'article sous le nom d'effet Pockels qui correspondent de façon générale à un rayonnement émis à la fréquence somme ou différence des rayonnements incidents. C'est ainsi que la génération de second-harmonique permet de convertir le rayonnement visible au proche ultra-violet ou encore le proche infra-rouge au spectre visible. Dans le cas de l'effet électro-optique, un des champs incidents n'est pas vraiment un rayonnement au sens optique puisqu'il s'agit d'un champ (ou d'une tension) électrique, dont la fréquence est faible par rapport à celles du spectre optique (typiquement de l'ordre de 10^9 Hz pour une dynamique déjà très rapide de la tension appliquée de l'ordre du GigaHertz à comparer aux 10^{14} à 10^{15} Hz des fréquences du spectre optique). La fréquence du champ électrique ou radioélectrique

appliqué au matériau non-linéaire quadratique vient moduler à plus basse fréquence celle du champ optique, aboutissant à un rayonnement modulé en fréquence et porteur de l'information véhiculée par le champ (radio)électrique. L'ensemble de ces effets correspondent de façon imagée (mais justifiable au niveau quantique adéquat) à des effets de fusion de photons, qui se traduisent par la disparition de deux photons incidents aboutissant à la génération d'un photon à la fréquence somme ou différence. On peut faire correspondre à ces effets de fusion de photon des effets symétriques de fission de photons, obéissant aux mêmes lois. Les effets associés à une telle fission de photons sont appelés effets paramétriques quadratiques et relèvent de façon essentielle de phénomènes quantiques. C'est ainsi qu'un photon unique se dissocie en une paire de photons et la nature cohérente de cette dissociation crée un lien de parenté entre ces deux entités, qui n'en forment en réalité qu'une seule. Un tel « enchevêtrement* » ne peut toutefois perdurer au-delà d'un temps en général très bref, appelé temps (ou durée de vie) de cohérence, lié à un ensemble de phénomènes perturbatifs au travers de fluctuations, de collisions et autres événements aléatoires, créateurs de déphasages et de dissipations énergétiques qui en viennent inmanquablement à dissocier ce lien initial. Une grande partie des expériences de ces dernières décennies visant à tester les axiomes de la mécanique quantique et en particulier la possibilité d'une action instantanée à distance, reposent sur ces paires de photons dites « enchevêtrées* » issues d'une dissociation paramétrique au travers d'un matériau non-linéaire de type quadratique. Elles visent à démontrer l'impossibilité de faire une mesure sur un des photons sans que cette action soit immédiatement perçue dans une mesure sur son jumeau (Cf. *Corrélation quantique**)

A un niveau plus pratique, les effets paramétriques sont à la base de la mise au point de sources de rayonnement cohérent accordables qui ont considérablement élargi le spectre d'émission « naturel » des lasers, depuis le lointain infra-rouge, voir le rayonnement aux fréquences de la gamme des TeraHertz (soit 10^{12} Hz correspondant en spectroscopie aux niveaux de rotation-vibration des molécules, pour l'étude desquels les klystrons étaient les seules sources de rayonnements disponibles, au demeurant peu pratiques et puissantes), jusqu'aux UV profonds et bien au-delà, si l'on inclut les effets relativistes associés à la génération d'harmoniques d'ordre élevé.

Joseph Zyss

OPTIQUE ONDULATOIRE (Cf. Optique physique*)

OPTIQUE PHYSIOLOGIQUE

OPTIQUE PHYSIQUE

Etude de la lumière comme propagation d'ondes électromagnétiques et interaction de ces ondes avec la matière décrite de manière classique ou de manière quantique. Etude des phénomènes d'interférence*, de diffraction* et de polarisation* de la lumière par passage à travers les cristaux.

L'onde lumineuse est caractérisée comme toute onde par la fréquence des vibrations (du champ électromagnétique), la vitesse de phase (vitesse de propagation de la phase, vitesse de propagation du signal lumineux, qui vaut c , la fameuse constante universelle, pour toutes les ondes électromagnétiques) et la vitesse de groupe (vitesse de propagation de l'énergie) égale à c dans le vide.

Cette dernière vitesse est plus petite que c dans un milieu autre que le vide, parce que le milieu assure la propagation de l'onde par des absorptions et des réémissions successives qui freinent la progression de l'énergie. C'est ce qui définit la réfringence ou coefficient de réfraction du milieu $n = c / \text{vitesse de groupe}$. La vitesse de groupe tout comme l'indice de réfraction dépendent de la fréquence. C'est l'augmentation de l'indice de réfraction avec la fréquence qui « explique phénoménologiquement » la dispersion de la lumière blanche par le prisme. Mais il faut noter que si le violet est plus dispersé que le rouge, c'est dû à ce que les énergies mises en jeu dans l'interaction avec la matière sont plus grande et de ce fait la propagation en est plus lente. On voit là combien le terme de « vitesse de vibration » utilisé parfois pour désigner la fréquence est malheureux, car plus cette vitesse est grande plus l'onde lumineuse est lente dans un milieu différent du vide.

Il est donc essentiel de prendre en considération les mécanismes microphysiques d'absorption de la lumière. En particulier si l'on veut rendre compte du statut du spectre visible où l'on passe des énergies qui se bornent à faire vibrer les molécules (infrarouge) à des énergies qui excitent les électrons (visible et ultraviolet). Ce ne sont pas les qualités propres de la lumière qui sont mobilisées, l'infra rouge valant bien l'ultra violet, mais les possibilités d'interaction de la lumière avec la matière (et partant avec le système perceptif).

La grande philosophie de l'optique du XX^{ème} siècle est de comprendre que la lumière ne vaut pas tant comme objet que comme révélateur des possibilités de changement de la matière et comme intermédiaire des interactions entre les éléments matériels.

Peu importe la vibration, l'essentiel est de voir vibrer la matière sous son influence. Encore ne fait il jamais oublier que l'on n'observe pas la vibration directement, seule l'énergie se manifeste. On n'observe jamais le champ mais le carré du champ, c.a.d. l'énergie. Et c'est cette énergie, ou du moins les échanges d'énergie que la théorie quantique affirme se produire par « paquets » (photons*).

La théorie quantique a introduit une grande révolution culturelle en montrant que la lumière ne vaut qu'en tant que vecteur des échanges d'énergie et que ce sont les réponses de la matière aux sollicitations lumineuses qui font la richesse de l'optique. Cette philosophie ne pouvait s'affirmer au XIX^{ème} siècle, tout occupé par la théorie ondulatoire de la lumière. Fresnel* et Maxwell* y ont écrit une grande partie de l'optique moderne. Mais l'histoire ne s'arrête pas là et l'optique n'atteint sa maturité qu'avec l'étude des interactions lumière-matière, dont le pionnier est Gustav Kirchoff*, le héros de la spectroscopie atomique. La lumière devient reine en révélant les spécificités structurales de la matière. Celadevenait de plus en plus clair à la fin du XIX^{ème} siècle et l'on peut regretter que les organisateurs de l'exposition « Les origines de l'art abstrait » (Musée d'Orsay. Hiver 2003) n'aient pas noté ce point essentiel de l'histoire de la lumière et de la couleur, en laissant s'exprimer sans commentaires une conception de la lumière-objet, propre au XIX^{ème} siècle , en passe de devenir caduque. Emboitant ainsi le pas aux impressionnistes, mais affermissant de ce fait chez la plupart des visiteurs une vision fautive et dépassée du véritable statut de la lumière.

OPTIQUE QUANTIQUE

Ensemble des phénomènes optiques où se manifeste l'aspect corpusculaire de la lumière, en particulier à travers les fluctuations* des propriétés lumineuses. C'est donc l'ensemble des phénomènes optiques où le champ électromagnétique de la lumière doit être traité de manière quantique et où l'électrodynamique quantique* (Théorie quantique du champ électromagnétique et de ses interactions avec la matière) joue un rôle essentiel. L'Optique Quantique, c'est le règne du Photon*, quantum du champ électromagnétique.

Mais il faut se méfier de ce point de vue qui fait la part trop belle au besoin des physiciens d'élaborer une ontologie de la lumière.

Il vaut mieux dire que l'Optique Quantique est une optique statistique, pour souligner le fait que la différence essentielle entre l'Optique Quantique et l'Optique Classique n'est pas tant dans l'intervention du photon que dans le rôle fondamental joué par les

phénomènes de fluctuation. Le photon permet bien sûr l'interprétation de ces fluctuations, sans perdre de vue qu'il ne s'agit pas d'une petite boule de billard mais d'un objet quantique*. D'ailleurs en l'absence de photons, il existe des fluctuations résiduelles (le vide quantique*)

L'Optique Quantique commence d'ailleurs historiquement par l'étude des fluctuations dans le rayonnement du Corps Noir*, ce qui est le sujet des beaux travaux d'Einstein et l'origine théorique de la notion de photon.

La formulation de l'Optique Quantique n'est d'ailleurs pas, en accord avec l'esprit de la Mécanique Quantique, une description de la nature de la lumière, mais une description de la nature des observations que l'on peut faire sur la lumière, bien souvent d'ailleurs en "détectant des photons".

Les fluctuations sont les fluctuations observées dans ces expériences. Elles sont reliées aux différents états possibles de la lumière, qui sont les seules descriptions théoriques de la nature de la lumière telle qu'elle est observée.

Pour ce qui est des "fluctuations du vide*" elles ne sont pas observables directement, mais certains effets bien observables peuvent être interprétés en invoquant l'influence de telles fluctuations, ce qui ne suffit pas à prouver leur existence réelle.

Les grands sujets de l'Optique Quantique sont :

Les fluctuations dans le rayonnement du corps noir*

La détection de la lumière et le comptage des photons (photodétection*)

L'étude des corrélations et de la statistique de groupement de photons

Les différents états quantiques de la lumière (état cohérent*, état comprimé*)

ORDINATEUR

ORDINATEUR QUANTIQUE

ORDRE

Existence d'une relation entre les éléments d'un ensemble permettant de constituer une liste unique d'éléments. Chaque élément a dans cette liste une position bien définie avant ou après tel ou tel ou autre.

Tous les grands systèmes philosophiques ou théologiques ont été construits sur la question de l'ordre opposé au désordre*, avec une nette préférence pour l'ordre. La pensée scientifique est avant tout fondée sur l'hypothèse de l'existence d'ordre dans la nature, ne fût-ce que par l'existence des lois* de la nature. La pensée primitive, tout comme les mythologies ou la pensée religieuse s'organisent autour d'une mise en ordre hiérarchisée de la nature.

Les concepts d'espace* et de temps* sont avant tout des concepts d'ordre.

La création d'ordre peut être due soit à un agent extérieur qui manifeste par là une volonté ou un projet, comme lorsque l'on pousse une balançoire, soit à un phénomène d'auto organisation* que l'on a pu appeler un « ordre gratuit », comme dans un auto-oscillateur*. Comme toute création d'ordre correspond à une diminution d'entropie*, le système où cet ordre apparaît doit être ouvert* pour permettre à l'entropie de croître dans l'environnement. C'est explicitement le cas dans l'émission stimulée d'ondes électromagnétiques par un laser* et sans doute implicitement le cas dans l'émission spontanée* de lumière, qui mettent tous les deux en œuvre des phénomènes dissipatifs*.

L'apparition d'ordre est en général associée à une brisure de symétrie*, ce qui peut paraître à priori paradoxal car la symétrie donne un sentiment d'ordre, sentiment trompeur d'équivalence, rassurant par l'absence de formes*.

ORGANICISME

ORGANISME

ORGANISATION

On dit d'un phénomène ou d'un système qu'il présente une organisation lorsque ses différents éléments ou parties constituantes présentent entre eux une certaine corrélation*. L'organisation peut être temporelle ou spatiale ou spatio-temporelle. Toute variable qui reflète le degré d'organisation est appelée paramètre d'ordre*. C'est la quantité qui permet le mieux de caractériser une transition de phase* ou un changement de conformation*.

L'organisation implique la notion de forme* et par là celle d'information* qui renvoie à nouveau à la causalité*.

ORGANISATION D'UN SYSTEME BIOLOGIQUE

Il y a de nombreuses approches du problème de l'organisation d'un système complexe qu'est un système biologique. Toutes ces approches ont jusqu'ici utilisé des modèles de nature physico-mathématique. Une approche spécifiquement biologique n'existe pas. On rencontrera souvent la conception des niveaux de réalité*. En particulier l'existence des trois niveaux fondamentaux : physique (forces*, conformations spatiales, thermodynamique*, flux électriques), chimique (réactivité des atomes* et des molécules*) et biologique (rapports complexes entre l'ADN* et la synthèse des protéines, s'insérant dans les chaînes de réactions chimiques autocatalytiques*, champ morphogénétique*). L'organisation psychologique par ailleurs couple le fonctionnement du système nerveux avec les éléments moteurs de l'organisme, en particulier musculaires).

Tous ces types d'organisation ont en commun de voir un ensemble discret d'éléments agir sur un autre ensemble discret d'éléments ayant un rôle fonctionnel dans l'organisme vivant. Ce modèle unique justifie une approche du problème par la théorie de l'information* et du codage*. Une approche informationnelle et sémiotique*. (Cf. Biosémiotique*)

Dans l'organisation biologique fonctionne un langage dont les lettres sont les bases des nucléotides*(adénine (A), thymine (T), uracile (U) dans l'ARN*, guanine (G), cytosine (C)). Ces lettres forment des signes* dans la biosynthèse, lorsque à un triplet de nucléotides correspond un processus de synthèse d'une protéine*, ce qui donne naissance à une sémiotique*. Il y a là deux types de codages, l'un qui forme des signes (mots) et l'autre qui leur donne un sens*. Les processus informationnels dans les systèmes naturels sont représentés par la relation entre ces deux types de codage.

La biologie moléculaire* a largement utilisé des métaphores* empruntées à la cybernétique* et à la théorie de l'information*. Ces métaphores ont eu souvent pour effet de masquer la complexité des phénomènes biologiques, qui réapparaît dans l'ère post-génomique* en privilégiant les phénomènes d'auto-organisation* (Cf. Auto-organisation en biologie*).

Toute l'organisation biologique implique des protéines*, qui sont pour ainsi dire le matériau de base du vivant.

L'organisation biologique est complexe à décrire et difficile à comprendre si l'on ne fait pas intervenir l'évolution biologique*.

ORIGINE DE LA VIE

ORIGINE DU MONDE (Cf. Cosmologie*)

OSCILLATEUR

Système physique effectuant des oscillations*: pendule, cordes d'un violon, circuit électrique, composants chimiques en réaction.....La théorie des oscillateurs est une théorie générale des phénomènes d'oscillation dans les systèmes de natures physiques les plus diverses. Un oscillateur est un système dynamique* caractérisé par un état* dans l'espace de phase* des variables essentielles. Cette double terminologie d'oscillateur et de système dynamique souligne le double aspect physique concret et mathématique abstrait du concept.

OSCILLATEUR CHAOTIQUE

Oscillateur non linéaire* avec frottement et entretien énergétique (autooscillateur*) présentant une dynamique chaotique. La périodicité du mouvement n'exclut pas le comportement chaotique des trajectoires de phase.

OSCILLATEUR DE VAN DER POL

Célèbre autooscillateur* vérifiant une équation d'oscillateur linéaire avec en plus une dissipation non linéaire. La découverte de cet oscillateur s'inscrit dans les travaux effectués par Van de Pol sur les générateurs radio en 1920 chez Philips. Phénoménologiquement le laser (générateur quantique) obéit à une équation de Van der Pol.

OSCILLATEUR HARMONIQUE QUANTIQUE

Système quantique correspondant à l'oscillateur harmonique* classique par une procédure de quantification*. L'équation de Schrödinger* de ce système est soluble analytiquement, ce qui en fait un système de référence comme l'atome d'hydrogène. Les solutions stationnaires* présentent une structure remarquable d'états* d'énergie équidistants, à partir d'un état fondamental d'énergie $E = \frac{1}{2} h\nu$, séparés les uns des autres par l'énergie $h\nu$. ν est ici la fréquence de l'oscillateur classique de départ. On a là l'exemple paradigmatique d'un système quantique à niveaux d'énergie discrets, où les échanges d'énergie ont lieu par « passage » d'un niveau à un

autre. Contrairement à l'oscillateur classique dont l'énergie la plus basse, au repos, est nulle, ici l'état fondamental a une énergie non nulle, ce qui a des conséquences multiples dans la physique quantique. Manifestation fondamentale de l'absence de repos en mécanique quantique, découlant des principes mêmes.

Au rôle essentiel joué par l'oscillateur harmonique en physique classique, correspond le rôle essentiel joué par l'oscillateur harmonique quantique en théorie quantique. La théorie quantique des champs* est fondée sur l'emploi mathématique du modèle de l'oscillateur harmonique quantique.

OSCILLATEUR LINEAIRE (OSCILLATEUR HARMONIQUE)

Le plus simple des systèmes linéaires*. Système qui lorsqu'il s'écarte de sa position de repos subit une force proportionnelle à cet écart. L'équation fondamentale du mouvement se présente à des coefficients constants près comme une égalité entre une variable et sa dérivée seconde, dont la solution est une fonction sinusoïdale*.

On considère aussi avec l'oscillateur libre l'oscillateur forcé par une force périodique comme c'est le cas pour la balançoire, et l'oscillateur libre amorti soumis à une force de frottement proportionnelle à la vitesse.

OSCILLATEUR NON LINEAIRE

Le plus simple des systèmes non linéaires*. Système qui lorsqu'il s'écarte de sa position de repos subit une force fonction non linéaire de cet écart. C'est le modèle le plus général d'oscillateur aussi bien dans le cas conservatif que dans le cas dissipatif.

Le mouvement d'un oscillateur non linéaire se représente particulièrement bien dans l'espace de phase* où les mouvements périodiques correspondent à des courbes fermées.

La non linéarité a des conséquences spécifiques :

Les mouvements périodiques ont des périodes qui dépendent de l'amplitude de l'écart initial, contrairement à l'oscillateur linéaire, dont c'était une propriété remarquable établie par Galilée.

Les mouvements périodiques ne sont pas des simples sinusoides mais des mouvements anharmoniques, c.à.d. des mouvements complexes décomposables en série de Fourier* comportant de nombreux termes harmoniques. La décomposition spectrale du mouvement comporte de nombreuses fréquences.

On peut assister dans certains systèmes dissipatifs* à l'apparition d'auto oscillations*, oscillations dont les caractéristiques sont déterminées par les caractéristiques du système lui-même et ne dépendent pas des conditions initiales concrètes.

Le régime qui s'établit dans le système peut dépendre qualitativement de la valeur de certains paramètres. On parle alors de bifurcations*. On peut étudier l'évolution des régimes dynamiques dans l'espace d'un paramètre. Une des bifurcation les plus connues est celle qui donne naissance à des autooscillations, la bifurcation d'Andronov*-Hopf, où un point fixe devient instable et est remplacé par un cycle limite*.

D'une manière générale dans un système non linéaire les trajectoires différentes ont un comportement différent. Il peut arriver dans les systèmes à plus de trois variables dynamiques que deux trajectoires dont les conditions initiales sont très voisines s'écartent irrémédiablement perdant toute analogie de caractère, c'est le chaos déterministe*.

OSCILLATION (VIBRATION)

Phénomène périodique (ou presque périodique) dans le temps, c'est à dire reprenant régulièrement le même aspect (se retrouvant dans la même phase*) après un intervalle de temps fixe appelé, période. La plus grande valeur atteinte par la grandeur physique qui varie est appelée amplitude de la vibration. La fréquence de la vibration est le nombre de périodes exécutées par unité de temps.

Les phénomènes oscillatoires peuvent se présenter sous des aspects très divers :

- Oscillations harmoniques (sinusoidales)
- Oscillations anharmoniques
- Oscillations de relaxation
- Oscillations amorties
- Oscillations quasipériodiques
- Oscillations chaotiques

OUSIA (ουσια)

Terme grec de la philosophie . Au sens habituel platonicien « essence* »

La traduction habituelle « substance* » ne parvient à rendre ni le sens d'être qui y est impliqué, ni le statut de cette notion dans la pensée d'Aristote*. On peut utiliser le terme neutre d' « étance* ».

La traduction de ousia par substance appartient à une tradition latine. Si on l'adopte aujourd'hui sans trop de discussion c'est à cause de son adoption par la philosophie moderne depuis Descartes* et de l'influence thomiste dans la première moitié du XX^e siècle.

OXYDO-REDUCTION

PANPSYCHISME

PANTHEISME

Le panthéisme est une pensée du Tout* que constitue la Nature*. C'est une identification de Dieu* et du Monde. Ce n'est pas un athéisme* mais une subversion des religions traditionnelles. Ce n'est pas un hasard si au cours des temps deux des panthéistes les plus connus Giordano Bruno* et Spinoza* aient été exclus par leur communauté religieuse d'origine. Le panthéisme est un monisme* extrême. Bruno disait « la connaissance de l'unité* de l'Être* et de la Nature* est le but et le terme de toutes les philosophies et de toutes les contemplations naturelles ».

Il y a deux manières de concevoir le panthéisme, suivant que l'on absorbe l'univers en Dieu, en disant que Dieu est tout ; ou Dieu dans l'univers en disant que tout est Dieu. Dans le premier cas le monde n'est qu'un ensemble de phénomènes ou de modes de Dieu, sans existence substantielle et distincte ; dans le second, c'est Dieu qui cesse d'être un être à part, pour n'être plus qu'une force générale, répandue dans la nature et qui se confond avec elle ; cette dernière espèce de panthéisme est un naturalisme* proche de l'athéisme* ou du matérialisme*.

De tous temps il y a eu des panthéistes. Parmi les plus connus, Plotin*, Bruno*, Spinoza*, Schelling* et Hegel*. La France a connu peu de panthéistes à moins que le Philosophes des Lumières* (Diderot*, d'Holbach*) qui expliquaient tout par la nature n'en fasse partie.

PARADIGME

En sémiotique et plus précisément dans la syntaxe, un paradigme est un ensemble de signes* membres d'une même catégorie tout en ayant des significations très différentes. Ainsi par exemple en linguistique tous les verbes d'action utilisables pour un homme.

La notion de paradigme s'oppose à celle de syntagme*, et l'on dénomme « axe paradigmatique » le point de vue paradigmatique.

Les éléments d'un paradigme ne sont pas simultanément présents dans un message donné, pour lequel ils constituent une réserve potentielle.

R. Barthes* a mis en évidence les paradigmes et les syntagmes* du système vestimentaire. Les paradigmes sont les pièces du costume qui ne peuvent être portées en même temps (chapeaux, pantalons, chaussures). Les syntagmes sont la juxtaposition des différents éléments constituant un costume donné (des chaussures au chapeau).

Un menu dans un repas peut être analysé selon la même dichotomie.

En philosophie des sciences* le terme a été popularisé par Kuhn* pour désigner l'ensemble des croyances, des valeurs et des techniques qui sont communes aux membres d'une communauté scientifique. C'est en quelque sorte le style de cette communauté ou des théories qu'elle développe. Le passage d'un paradigme à un autre constitue une « révolution scientifique* ».

PARADOXE

Le paradoxe est un énoncé contraire à l'opinion commune. Il est inattendu, étrange et souvent en contradiction avec la réalité admise. Une affirmation dont la vérité est difficile à établir. Le paradoxe ne doit pas être confondu avec le sophisme* qui est un énoncé volontairement provocateur, une proposition fautive reposant sur un raisonnement apparemment valide. Les fameux paradoxes de Zénon ne sont que des sophismes, en fait des apories*. Les paradoxes ne consistent pas à prouver des choses contradictoires ; ce sont des arguments servant à dénoncer une mauvaise conception et de faux problèmes qui se partagent en deux espèces, les problèmes inexistants et les problèmes mal posés. Selon que la cause de la contradiction se situe dans notre modèle du monde, dans une erreur d'argumentation ou dans une conclusion impossible on distingue différentes classes de paradoxes. Les paradoxes de Zénon ou les paradoxes de la relativité* sont du premier type, ils résultent d'une mauvaise conception du monde. Dans le second cas il s'agit le plus souvent de glissements sémantiques ou même de simples jeux de mots. Dans le troisième cas il

s'agit en général de paradoxes de l'auto-référence*, comme le paradoxe du menteur : « cette phrase est fausse » ou le paradoxe de Russel*. Les paradoxes peuvent conduire à des antinomies*, qui sont à l'origine des tentatives d'axiomatisation des théories (axiomatique*, métathéorie*, formalisme*).

Les paradoxes jouent un rôle non négligeable dans l'élaboration et la compréhension des théories physiques en suscitant des critiques et des débats contradictoires accompagnés souvent de nouveaux développements de la théorie. Les paradoxes de la relativité*, les paradoxes de la cosmologie* et les paradoxes de la mécanique quantique* sont de ceux là. Le paradoxe EPR* est dans les temps modernes la source du plus grand débat scientifique et philosophique auquel le monde savant ait pris part, à l'origine des développements scientifiques de la théorie des états enchevêtrés* et de l'information quantique*.

PARADOXE DE BANACH-TARSKI

Le paradoxe de Banach-Tarski, dû à Stefan Banach et Alfred Tarski, montre qu'il est possible de couper une boule de \mathbb{R}^3 en un nombre fini de morceaux et de réassembler ces morceaux pour former deux boules identiques à la première. Il montre qu'il existe des morceaux non-mesurables, sans quoi on obtiendrait une contradiction (la longueur, la surface ou le volume étant des exemples de mesures*). Il existe des parties de \mathbb{R}^3 pour lesquelles la notion de mesure (et donc de volume) n'a pas de sens.

La démonstration de ce paradoxe utilise l'axiome du choix*, qui a été et est toujours contesté par certains mathématiciens. Par ailleurs, cet axiome est nécessaire pour construire des ensembles non mesurables.

C'est le grand divorce entre la physique dont les théories sont étayées par les résultats de mesure, et les mathématiques où la mesure même est objet de théorie. En pratique la transformation de Banach-Tarski est impossible avec des objets de la vie courante : elle nécessite des coupures infiniment fines, ce qui est physiquement impossible, à cause de la taille des atomes.

PARADOXES DE LA COSMOLOGIE

PARADOXES DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

PARADOXES DE LA RELATIVITE

PARADOXES DE ZENON D'ELEE

Aristote* rapporte un certain nombre de paradoxes dus à Zénon d'Elée(Vème siècle avant JC) concernant l'infini* et le mouvement*.

Les trois paradoxes les plus connus sont

- **DICHOTOMIE** : Le mouvement est impossible, car avant d'arriver à destination, ce qui se meut doit d'abord arriver au milieu, et ainsi de suite ad infinitum.
- **ACHILLE** : La tortue plus lente ne peut pas être rattrapée par le plus rapide Achille, car il doit d'abord aller au point où la tortue était, et entretemps elle aura déjà quitté ce point, et ainsi de suite ad infinitum.
- **LA FLECHE** : Une flèche lancée avec un arc est immobile à chaque instant. Le temps étant fait d'une infinité d'instant la flèche est immobile à jamais. Si le temps est une somme de moments indivisibles où la flèche est immobile, elle est immobile tout court.

Bertrand Russel*écrivait que les apories* de Zénon sous toutes leurs formes concernent presque toutes les théories de l'espace*, du temps* et de l'infini* proposées jusqu'à nos jours. Leur discussion a approfondi d'une manière essentielle des concepts comme, le rôle du continu* et du discret dans la nature, l'adéquation entre le mouvement physique et ses modèles mathématiques. Discussions qui se prolongent jusqu'à aujourd'hui et forment la toile de fond de toute philosophie naturelle*.

Il y'a deux points de vue sur ces paradoxes selon que l'on s'intéresse aux sommes infinies ou à la nature continue du mouvement.

Le premier est qu'il ne nie pas le mouvement, mais plutôt conteste sa continuité, qui est ce qui amène aux paradoxes. En ce sens, on peut considérer que Zénon souffre d'une forme de difficulté technique, et que le problème peut aujourd'hui être résolu facilement grâce au calcul infinitésimal ou en considérant la somme convergente d'une série géométrique. Zénon ignore qu'une somme infinie de termes peut avoir pour limite un résultat fini.

Cette interprétation est toutefois réductrice, en cela qu'elle postule arbitrairement l'existence du mouvement et se concentre sur le

seul argument technique de la cohérence de la continuité, qui est bien un problème mathématique et non pas physique ou philosophique.

La deuxième interprétation est que Zénon nie fondamentalement le mouvement, dans le sens ultramoderne de Parménide*, pour qui tout changement est illusoire et le monde est statique et éternel. Il ne nie pas l'apparence du mouvement, mais sa réalité. Les paradoxes se manifestent alors plus en profondeur, par la comparaison entre le phénomène du mouvement et sa disparition impliquée par l'analyse approfondie de son modèle : qu'il soit continu (dichotomie) ou qu'il soit discontinu (flèche). La question posée devient alors une question purement physique, dont la réponse doit s'inscrire dans une théorie physique : pourquoi l'expérience du mouvement si le mouvement apparaît logiquement impossible?

Dans le modèle continu classique, la flèche doit assumer une infinité d'états pour parcourir la distance entre deux points. Si une telle séparation infinie entre chaque couple d'événements, modélisée par l'absence de successeur d'un nombre réel, équivaut ou non à leur isolement physique, est une question physique, Si la divisibilité infinie est mathématiquement cohérente, elle n'est pas nécessairement physiquement significative (Cf. aussi le paradoxe de Banach-Tarski*).

Les paradoxes de Zénon ont entraîné les commentaires les plus divers.

Aristote considérait la matière comme continue et indéfiniment divisible. Pour lui, quoique l'intervalle de temps puisse être divisé sans fin, on ne peut le reconstituer avec des points (moments) isolés. Cette division infinie est sans rapport avec l'infinité du temps.

Pour les atomistes comme Leucippe, élève de Zénon et maître de Démocrite, Epicure et Lucrèce, le monde est discret et constitué d'atomes indivisibles en mouvement perpétuel et de vide. On ne peut rien mesurer de plus petit que l'atome, il existe un intervalle de temps mesurable minimum. L'idéalisation mathématique de ce modèle représente chaque corps, figure ou ligne comme la réunion d'un nombre infini d'infiniments petits indivisibles (méthode des indivisibles qui reçoit un développement particulier au XVIIème siècle). Ceci évacue l'infini des paradoxes de Zénon.

La théorie générale du mouvement avec une vitesse variable a été développée à la fin du XVIIème siècle par Newton* et Leibniz*. L'analyse mathématique* s'appuie sur le concept d'infiniment petit,

mais dans la discussion sur sa nature apparaissent à nouveau les deux points de vue antiques.

La première approche soutenue par Leibniz* a dominé le XVIIIème siècle. Comme l'atomisme antique elle considère les infiniment petits comme une forme particulière de nombre. Cette approche n'a reçu un fondement rigoureux que dans l'analyse non standard* développée au XXème siècle par Robinson. Les infiniment petits de Robinson ressemblent peu aux atomes antiques, ne fût-ce que parce qu'ils sont infiniment divisibles, mais ils permettent de considérer correctement une courbe continue dans l'espace et le temps comme consistant en un nombre infini de parties infiniment petites.

La seconde approche a été proposée par Cauchy* au début du XIXème siècle. Son analyse utilise la notion de nombre réel* et la conception de limite*. Newton*, d'Alembert* et Lagrange soutenaient ce point de vue, avec une position variable.

Les deux approches sont pratiquement équivalentes. La seconde est adoptée par l'analyse infinitésimale* classique. Du point de vue de la physique la première est la plus commode. Dans les manuels de physique on trouve le genre de phrase suivante « soit dV un volume infiniment petit... ». Laquelle des deux approches est la mieux adaptée à la réalité physique est une question non résolue. les nombres infiniment petits

Dans la première approche il n'est pas clair ce à quoi correspondent dans la nature les nombres infiniment petits. Dans la seconde l'adéquation entre le modèle mathématique et le modèle physique est gênée par le fait que l'opération de passage à la limite est une modalité instrumentale, qui n'a aucun analogue dans la nature. En particulier il est difficile de parler de l'adéquation physique de séries infinies, dont les éléments se rapportent à des intervalles aussi petits que l'on veut d'espace et de temps. Il n'est pas démontré que l'espace et le temps ont la même structure que les nombres réels. La mécanique quantique* a rendu le problème encore plus complexe en privilégiant un monde microphysique discret (Cf. Quantification de l'espace-temps*).

Ainsi donc la discussion sur la structure de l'espace, du temps et du mouvement inaugurée par Zénon est loin d'être achevée.

Dans les apories de Zénon il n'est pas question de modèle mathématique mais de mouvement réel. Cela n'a pas de sens de se limiter à une analyse purement mathématique, car ce que Zénon met

en doute c'est précisément l'application au mouvement réel d'un modèle mathématisé.

Hilbert et Bernays (1934) écrivent que le paradoxe « *consiste en ce qu'une suite infinie d'évènements se succédant les uns aux autres, une suite dont nous ne pouvons pas imaginer l'aboutissement, physiquement ou en principe, aboutisse en réalité* ». Ils considèrent que les paradoxes expriment la non adéquation du modèle mathématique continu et indéfiniment divisible avec la matière physique discrète. « *Il ne faut pas obligatoirement croire que la représentation mathématique spatio-temporelle du mouvement a une signification physique pour des intervalles d'espace et de temps arbitrairement petits* ». En d'autres termes les paradoxes apparaissent de par l'application incorrecte à la réalité des concepts idéalisés de « point de l'espace » et de « moment temporel » qui n'ont aucun analogue dans la réalité, car tout objet physique a des dimensions non nulles et ne peut pas être divisé à l'infini.

Bourbaki* écrit : « *La question de la divisibilité infinie de l'espace (posée déjà par les premiers pythagoriciens) a amené, on le sait, des complications dans la philosophie : des Eléates à Bolzano et Cantor* les mathématiciens et les philosophes n'ont pu résoudre ce paradoxe-comment une grandeur finie peut consister en un ensemble infini de points de mesure nulle* ».

PARADOXE DE RUSSEL

Paradoxe* ou antinomie* de la théorie des ensembles* participant à la crise des fondements des mathématiques*

On peut formuler le paradoxe ainsi : l'ensemble des ensembles n'appartenant pas à eux-mêmes appartient-il à lui-même ? Si on répond oui, alors, comme par définition les membres de cet ensemble n'appartiennent pas à eux-mêmes, il n'appartient pas à lui-même : contradiction. Mais si on répond non, alors, il a la propriété requise pour appartenir à lui-même : contradiction de nouveau. On a donc une contradiction dans les deux cas, ce qui rend l'existence d'un tel ensemble paradoxal.

Les ensembles ordinaires sont ceux qui ne sont pas eux-mêmes éléments de l'ensemble ; l'ensemble des nombres naturels n'est pas un nombre naturel. On peut imaginer des ensembles extraordinaires qui s'avèrent éléments d'eux-mêmes, comme l'ensemble de tous les ensembles. On peut effectivement se demander à quelle catégorie appartient l'ensemble des ensembles ordinaires : ordinaire ou

extraordinaire ? Supposons qu'il soit ordinaire, il ne s'appartient pas à lui-même, il manque donc un ensemble ordinaire à l'ensemble des ensembles ordinaires. Si l'on suppose qu'il est extraordinaire, il s'appartient donc à lui-même et fait partie des ensembles ordinaires puisque l'on s'intéresse à l'ensemble des ensembles ordinaires. Que de contradictions .

Le paradoxe utilise très peu des propriétés de l'appartenance, une relation binaire suffit, ce qui a permis à Bertrand Russell de l'illustrer sous la forme plus imagée, mais qui a la même structure, du paradoxe du barbier. Un barbier se propose de raser tous les hommes qui ne se rasent pas eux-mêmes, et seulement ceux-là. Le barbier doit-il se raser lui-même ? L'étude des deux possibilités conduit de nouveau à une contradiction.

S'il se rase lui-même il fait donc partie de ceux qui se rasent eux-mêmes et donc ne devrait pas être rasé par le barbier, donc par lui-même. S'il ne se rase pas lui-même il doit donc être rasé par le barbier donc par lui-même.

On résout le problème en affirmant qu'un tel barbier ne peut exister (ou, en jouant sur les mots, qu'il n'est pas un homme), ce qui ne surprendra personne : il n'y a pas vraiment de paradoxe. Plus exactement la démonstration qui précède constitue justement une démonstration de la non-existence d'un tel barbier. Pièges de l'autoréférence*.

Pour esquiver ces contradictions de la théorie naïve des ensembles on a montré qu'une théorie axiomatique des ensembles peut être formulée sans que la contradiction apparaisse. C'est ce que fait Bourbaki* pour lequel l'ensemble de tous les ensembles n'est pas un ensemble.

PARADOXE E.P.R. (Cf. EINSTEIN, PODOLSKY et ROSEN*)

PARAMAGNETISME

PARITE (VIOLATION DE LA)

La parité, notée par la lettre P, consiste à inverser les coordonnées spatiales comme un miroir inverse l'image d'un objet. Les interactions électromagnétique* et forte* sont invariantes par parité, c'est-à-dire qu'il est impossible de distinguer un phénomène physique gouverné par ces interactions de son image dans un miroir. L'interaction faible*, au contraire, viole la parité.

PARTICULE

PARTICULES ELEMENTAIRES

Les habitants du zoo qui fait la gloire de l'atomisme* du XXème siècle. Ce sont les particules fondamentales, en général insécables, qui constituent la matière par delà même les atomes. La plupart sont instables et ont des durées de vie très courtes. On en dénombre plus de 500 qui vivent et meurent dans l'univers* et dans nos accélérateurs.

According to current physics, everything in the universe is made up from twelve basic fundamental particles (which give rise to approximately 200 particles), governed by four fundamental interacting forces. The standard model (SM) deals with three of them: electromagnetic, weak, and strong forces. At this stage, it constitutes our best understanding of how these particles and the relevant forces are related to each other. However, gravitation is still out of the picture. It is supposed that gravitation is also connected to a putative particle, called graviton. Thus, current physical theorizing at this level is based on the concept of 'particle'. It is not surprising then to find those who insist that 'the idea of a particle, [although] required modification with the advent of quantum theory, (: : :) remains central to scientific explanation' [12]. In this respect, on a realist reading, particles are the reality of present-day SM.

Un atome* n'est pas une particule élémentaire, car il est fait de protons* et de neutrons* dans son noyau et d'électrons* autour. Les protons et les neutrons sont considérés comme particules élémentaires bien qu'ils soient faits de quarks*. Les quarks et les électrons sont insécables.

Toutes les particules se manifestent par un échange d'énergie quantifié avec un détecteur*. Une particule c'est un quantum* d'énergie d'un champ, appelée particule parce qu'elle correspond au « clic » du détecteur.

La masse au repos* est une caractéristique fondamentale d'une particule élémentaire. Le photon a une masse au repos nulle. Est-ce une particule élémentaire ? Oui. Elle n'est jamais au repos. Elle se manifeste par son énergie*.

Strictly speaking, if we consider the mathematical formulation of the SM, we just find fields. The standard model is a (mathematical) theory of fields: there are scalar fields, vector fields, tensor fields, spinors fields, and so on (see [6, p. 24]). In this context, particles are special situations of fields: they are certain excitations of quantum fields, or, as B. Falkenburg [8] notes, 'epiphenomena of fields'. An electron, for instance, is an electron-field, whereas a proton is a proton-field. Fields are the most basic entities referred to by the theory, and particles arise out of them. At first glance, we don't know what fields (and hence 'particles') are, for it depends on the particular interpretation of the theory, and how it is applied. If the ontology of a theory comprises the most basic kind of entity that the theory posits (see Cao [4]), the reduction of the concept of particle to the concept of field turns the ontology of QFT into an ontology of fields. However, as

we noted, particles still emerge, and cannot be dismissed, at least as far as the discourse of the physicists is concerned. Michael Redhead [17] said that even in QFT "a particle grin" remains, yet it may just be an 'operational'

Les physiciens se sont inspirés des méthodes des zoologistes : « Quand on ne comprend pas, on classe ! ». Toute classification réussie recouvre en fait des structures plus profondes (Cf. par exemple la classification périodique des éléments de Mendéleev*).

Le zoo des particules élémentaires a été divisé en groupes suivant le type d'interaction qu'elles subissent. On a d'abord formé deux classes : les leptons* (particules qui ne subissent pas l'interaction forte*) et les hadrons* (qui subissent l'interaction forte). Les hadrons ont à leur tour été divisés en mésons* (particules de masse intermédiaire) et baryons* (de grande masse). Enfin, ces derniers ont été divisés en nucléons* (les constituants du noyau atomique, à savoir neutron* et proton*) et hypérons*.

Petite litanie des particules élémentaires selon Le "Modèle Standard"

Les atomes sont constitués d'électrons* e et de noyaux*.

Le noyau est constitué de protons* p et de neutrons* n.

Les protons et les neutrons sont constitués de trois quarks*, de deux types u et d : p=uud, n=ddu.

Le neutron subit la désintégration $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$ où $\bar{\nu}$ est l'antineutrino électronique.

La plupart des particules élémentaires possèdent une antiparticule* jumelle ayant la même masse mais une charge de signe contraire (ex. électron-positron*). Le photon* qui n'a pas de charge, n'a pas d'antiparticule.

Il existe quatre types d'interactions entre particules élémentaires.

L'attraction des électrons par le noyau dans les atomes est un exemple de l'interaction électromagnétique*.

L'attraction des quarks* entre eux est un exemple d'interaction forte*. Les particules participant aux interactions fortes sont appelées hadrons*. On y distingue les baryons* constitués par trois quarks* (ex proton* et

neutron*) et les mésons* constitués par un quark et un antiquark.

La désintégration est un exemple de la manifestation de l'interaction faible. Les particules participant aux interactions faibles sont appelées leptons*. Ce sont des fermions*. Avec les quarks elles sont les fermions fondamentaux qui constituent la matière au sens ordinaire.

Toutes les particules élémentaires, sauf le photon, s'attirent l'une l'autre sous l'effet de l'interaction gravitationnelle*.

Chaque groupe de particules est caractérisé par des lois de conservation* spécifiques lors des transformations auxquelles elles participent. Ainsi se conservent la charge baryonique*, la charge électrique, les charges leptoniques* . Par ailleurs lors des interactions fortes il y'a des lois de conservation approchées- le spin isotopique*, l'étrangeté*, le charme*, qui sont violées lors des interactions faible et électromagnétique. A chaque loi de conservation correspondent des symétries définies pour les équations du mouvement.

Les interactions fondamentales sont décrites par des champs* de forces.

Ce sont des champs de jauge*. L'excitation de ces champs fait apparaître en théorie quantique des champs* des quanta -particules, les bosons* fondamentaux des champs de jauge.

Au champ électromagnétique correspond le photon*.

Au champ de l'interaction forte* correspondent les huit gluons*.

Au champ de l'interaction faible* correspondent les trois bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0

Au champ de gravitation, s'il recevait une formulation quantique, correspondrait un hypothétique graviton*.

PARTICULES IDENTIQUES (Systèmes de)

De très nombreux systèmes quantiques sont constitués de particules identiques, N fermions*-électrons ou N bosons*. Des

systèmes à N électrons se trouvent par exemple dans les atomes où les électrons entourent le noyau ou dans les solides comme les métaux conducteurs où les électrons extérieurs constituent un gaz conducteur. Les particules identiques sont indiscernables* ce qui a des conséquences profondes sur les propriétés de ces systèmes.

PARTICULES VIRTUELLES

Objets introduits dans le calcul des interactions en théorie des perturbations* dans la théorie quantique des champs* pour donner une image intuitive à certains intermédiaires mathématiques. Ces quanta-particules fictifs sont associés à une interprétation des diagrammes de Feynman* où l'on distingue des quanta réels associés aux lignes extérieures et des quanta virtuels associés aux lignes intérieures, ces derniers n'ayant plus entre leurs caractéristiques de lien relativiste fondamental, tout en participant à la non violation de la loi de conservation de l'énergie-impulsion ni par le diagramme total, ni en chacune de ses parties. Les lignes intérieures des graphes sont comme l'intérieur d'une boîte noire où se concoctent suivant des mécanismes étrangers à la physique observable les phénomènes physiques détectables dont les protagonistes sont les particules physiques illustrées par les ligne externes entrantes et sortantes de ces boîtes.

Ces particules virtuelles ne sont pas créées ou annihilées par les opérateurs de la seconde quantification*.

On peut dire de façon imagée, et imagée seulement, que les particules virtuelles sont des émanation du Vide* qui se voient dans l'impossibilité de se propager librement et donc dans l'obligation de disparaître dès l'accomplissement de leur rôle de messenger de l'interaction. Ainsi l'interaction électromagnétique entre deux particules chargées ou la self interaction d'une particule chargée avec elle même s'expriment par l'émission et l'absorption de photons virtuels.

On interprète parfois à l'aide de particules virtuelles les fluctuations* des observables de champ incertaines – ainsi le champ électromagnétique devient incertain dans un état* où le nombre de photons est fixé. C'est vouloir forcer la boîte noire* en donnant une caractéristique des choses observables avant même la mesure* ce qui va à l'encontre des principes de la mécanique quantique*. Le physicien est « malheureux » de ne pouvoir en théorie quantique caractériser

une situation avant observation, de ne pouvoir introduire des « attributs » de la matière*.

Il y a des circonstances dans lesquelles des particules virtuelles simulent des effets identiques à ceux des particules réelles. C'est ce fait qui légitime de traiter dans certains raisonnements les particules virtuelles comme si elles étaient réelles.

L'introduction des particules fictives, marque de la misère picturale de la théorie quantique, est la source de bien de confusions ou d'illusions conceptuelles à la mesure du pouvoir explicatif imagé ainsi obtenu. Le triomphe du "Comme si" en mettant quelque chose là où il n'y a rien. Le poids du langage qui permet de considérer le virtuel* comme un presque réel.

PARTIES (et le Tout) (Cf. Tout*)

PAULI (PRINCIPE D'EXCLUSION)

Principe découvert par Pauli* en 1925 à partir de considérations spectroscopiques, selon lequel dans un système de fermions (électrons..) deux particules ne peuvent se trouver dans le même état quantique. Ce principe découle aussi de l'indiscernabilité* des particules et du choix des fonctions d'ondes antisymétriques pour les fermions.

Principe d'exclusion mais aussi principe d'inclusion car il favorise dans la nature le comportement des électrons par paires de même état spatial mais d'états de spin opposé. Mettre les électrons par paires pour les empêcher de se repousser électrostatiquement. Voilà une des nouveautés de la physique quantique. Ces paires représentées par des couples de petites flèches de sens opposé expliquent bien des phénomènes quantiques de la structure atomique à la supraconductivité*.

Ces paires permettent d'expliquer la structure électronique de tous les édifices atomiques et moléculaires en régissant la construction des différentes couches électroniques. La célèbre classification périodique des éléments de Mendelév* en découle directement. La liaison chimique* offre un exemple très significatif de telles paires.

Dans certains cas le principe est violé temporairement donnant naissance à des entités chimique particulièrement réactives (radicaux libres) ou à des états spectroscopiques à côté des états excités*normaux.

PAVAGES DU PLAN

PAYSAGE (Cf. Art et science*)

Représentation graphique de la nature visuelle où nous vivons.

Le problème du paysage est à lui seul parmi bien d'autres, révélateur de la communauté des démarches de l'art* et de la science*. L'histoire de l'art comme celle de la science sont pavées de changements de point de vue et d'attitudes, y compris le changement majeur qui consiste à regarder l'art comme Art et la science comme Science.

L'apparition du paysage tout comme celle de la perspective* témoigne dans l'histoire de la culture européenne d'un renversement total de point de vue sur le monde qui se manifeste simultanément dans le développement de la science. C'est l'homme qui regarde la nature et non plus la nature qui regarde l'homme.

La nouvelle culture qui émerge à la fin du Moyen-Age, n'usurpe pas son nom d'Humanisme, car elle déplace le sens des rapports entre l'homme et la nature. Dans cette culture bourgeoise puis capitaliste, l'individu apparaît au premier plan, comme sujet, avec son pouvoir, sa sensibilité propre, son statut de générateur de toute l'objectivité. Le sujet se tient au dessus de l'objet, l'homme est déclaré le roi de la nature. A l'homme dans le monde succède le monde de l'homme. Ceci n'apparaît pas dans la culture de l'antiquité gréco-romaine. La prise de possession de la nature à travers la conception du paysage et de la peinture, comme fenêtre sur le monde, participe de ce même changement d'attitude, qui va caractériser la science moderne.

A l'ordre des choses succède l'ordre imposé par l'homme. La nature propose mais l'homme dispose. Aux critères de vérité issus de la logique des choses succèdent des critères de vérité* liés à l'efficacité de l'action. « *C'est vrai parce que cela marche* » devient la devise de la science. « *C'est vrai parce que c'est expressif* » devient la devise de l'art. En art comme en science, l'ontologie* cède le pas au fonctionnalisme* du consommateur. Que l'on consomme du paysage ou de l'art abstrait, de l'informatique ou des médicaments, c'est l'homme possesseur de la nature qui se manifeste.

PENSEE

PERCEPTION

La perception n'est pas quelque chose qui nous arrive ou qui entre en nous. C'est quelque chose que nous faisons. Mais ce n'est pas un simple processus dans le cerveau, mais une activité habile du corps tout entier. L'action joue un rôle dans la perception. De ce point de vue la perception ne se réduit pas aux sensations, mais aux sensations que nous comprenons. Le contenu d'une perception n'est pas comme le contenu d'une image. Le monde ne s'offre pas à notre conscience* en une seule fois, mais se trouve atteint graduellement par une recherche active et une exploration.

PERCEPTION DE L'ESPACE

PERCEPTION DES FORMES

PERCEPTION DU TEMPS

PERIODE

PERIODIQUE

PERSPECTIVE

PERTURBATION D'UN SYSTEME PHYSIQUE PAR L'OBSERVATION

PERTURBATIONS (THEORIE DES)

Méthode de résolution approchée des équations contenant un petit paramètre. Dans les équations décrivant un système physique la théorie des perturbations s'utilise lorsqu'une action (perturbation) agissant sur le système peut être considérée comme petite.

La méthode consiste à résoudre exactement le problème en l'absence de perturbation et à calculer la correction introduite par la perturbation. Le résultat obtenu peut à son tour servir d'approximation zéro pour le calcul d'une nouvelle correction.. Il en résulte l'expression de la solution cherchée sous la forme d'une série en puissance croissante de la perturbation. Lorsque la perturbation est réellement petite on peut se limiter aux premiers termes de la série.

Historiquement la théorie des perturbations a été pour la première fois utilisée en mécanique céleste pour la résolution

approchée du problème à trois corps. Ici l'approximation zéro est le problème de l'orbite képlérienne du problème à deux corps. Le troisième corps introduit une perturbation que l'on considère comme petite..

La théorie des perturbations est largement utilisée en mécanique quantique pour la résolution de l'équation de Schrödinger* chaque fois que l'interaction peut être scindée en deux termes, un terme principal déterminant essentiellement l'état du système et un terme beaucoup plus petit provoquant une légère modification de cet état..

La théorie des perturbations joue un rôle fondamental en théorie quantique des champs* et en électrodynamique quantique*, où elle permet de calculer les corrections apportées par les interactions entre particules. Les termes des séries de perturbation peuvent recevoir une interprétation comme des processus virtuels et se prêter à une représentation graphique (diagrammes de Feynmann*).

D'une manière générale c'est cette interprétation des termes correctifs comme des effets physiques à part entière qui constitue l'attrait essentiel de la théorie des perturbations, avec cependant toutes les ambiguïtés physiques d'une telle démarche interprétative. C'est ainsi que la théorie des perturbations appliquée aux électrons sagement localisés sur les liaisons chimiques d'une molécule exprime l'interaction entre ces électrons en termes de polarisation et de délocalisation, comme cherche à le faire la théorie classique de la structure moléculaire en terme de charges et de circulation d'électrons. Les difficultés de la représentation de Kékulé* du benzène* prennent dans ce cadre une dimension nouvelle.

L'interprétation picturale des termes correctifs cherche à pallier à la pauvreté figurative de la mécanique quantique.

PHASE (ESPACE DE)

Terme lié à la mécanique classique* pour désigner l'espace des états* d'un système dynamique*. Espace des valeurs du couple position-impulsion. C'est dans l'espace de phase que se manifestent les propriétés remarquables des équations du mouvement.

PHASE THERMODYNAMIQUE

Partie d'un système thermodynamique* chimiquement et physiquement homogène, séparée des autres parties par des surfaces frontières où les propriétés changent. Un mélange de gaz constitue une

seule phase, alors que le système eau- glace- vapeur consiste en trois phases. Le processus physique qui permet la transformation d'une phase en une autre est appelé transition de phase*.

PHASE D'UNE VIBRATION

Grandeur représentant à chaque instant l'étape d'un processus périodique, c .a .d. la fraction de la période* effectuée par le processus. C'est l'argument de la fonction périodique qui représente une vibration* ou une onde*.

PHENOMENE

PHENOMENALISME

Définition d'un objet par l'ensemble de ses aspects extérieurs. Doctrine dans laquelle on ne s'attache qu'à ce qui peut tomber sous les sens.

PHENOMENOLOGIE

Le terme phénoménologie apparaît pour la première fois dans le « *Nouvel organon* » (1764) de Lambert, désignant ainsi sa »doctrine du visuel«. On le retrouve plus tard chez Kant* dans les *Premiers principes métaphysiques de la science de la nature* (1786), où il désigne ainsi une partie de la doctrine du mouvement. Dans une lettre à Lampert, Kant considère la « *phaenomenologia generalis* » comme une propédeutique à la métaphysique*. Le terme sera ensuite utilisé par Fichte et par Hegel dans sa « *Phénoménologie de l'esprit* » où il expose le processus dialectique de développement propre de l'esprit.

PHENOMENOLOGIE TRANSCENDANTALE

Le terme de phénoménologie* prend au XX^e siècle une signification propre, désignant un des courants dominant de la pensée philosophique contemporaine. Le fondateur de la philosophie phénoménologique et du courant phénoménologique est Edmund Husserl*, qui a développé d'une manière critique la « psychologie descriptive » de F. Brentano*. Il a aussi subi aussi l'influence des conceptions philosophiques de Descartes*, de Leibniz*, de Hume* et de Kant*, dont il assimile les phénoménologies dans une doctrine qu'il

appelle successivement « néocartésianisme », « bergsonisme », « positivisme radical », pour dépasser les oppositions classiques entre rationalisme*, intuitionnisme* et empirisme*.

La phénoménologie de Husserl est une gnoséologie*, c.a.d. une théorie de la connaissance*. Elle participe d'un courant philosophique cherchant à redonner aux sciences un fondement expérimental. Elle n'est en rien une psychologie, car elle ne se préoccupe pas des états d'âme individuels. Elle cherche à fonder la science objective et universelle à partir du sens commun* par un juste retour aux choses. Dans ce but elle opère un renversement dans la conception de la perception*, en considérant que les choses ne viennent pas à nous mais que nous allons aux choses, grâce à l'intentionnalité*. Etrange retour de l'idée ancienne de l'optique selon laquelle c'est l'œil qui émet les rayons lumineux, mais il ne s'agit plus de l'œil, c'est la conscience* maintenant qui va aux choses. La particularité de la conscience est qu'elle est toujours conscience *de quelque chose*. Les sciences cognitives* aujourd'hui adoptent ce même point de vue du rôle actif du cerveau* dans une perception qui n'est plus abandonnée à l'œil.

La phénoménologie s'intéresse à la connaissance pré scientifique, au « monde de la vie » et cherche à comprendre comment la connaissance scientifique* est rendue possible, connaissance objective valable pour tout le monde dans une universalité sans conditions. Il oppose l'idée d'objectivité* à celle de vérité* associée à la vie pré et extra scientifique. L'objectif n'est en tant que lui-même jamais éprouvable. C'est bien ainsi du reste qu'il est considéré par les savants-dans-les-sciences-de-la-nature eux-mêmes, partout où ils l'interprètent, en opposition à leur discours empiriste* (qui n'est ici qu'un brouillage) bel et bien comme un transcendant*métaphysique*.

La spécificité de la phénoménologie consiste en ce qu'elle n'est pas en fait un construction théorique, mais une pratique d'un genre particulier, orientée vers le dévoilement et la pensée de l'expérience première. Démarche originale analogue à celle de la psychanalyse*. La maîtrise de la phénoménologie n'est possible que par la recherche phénoménologique.

La phénoménologie ne s'intéresse pas à l'aspect factuel de la connaissance, étudié par la psychologie et les disciplines voisines, mais aux fondements et aux structures signifiantes générales sous l'analyse philosophique. Husserl espérait inscrire dans l'idéal phénoménologique une philosophie comme science rigoureuse, en s'écartant de toute polémique avec le naturalisme*, l'historicisme et les autres formes de relativisme des conceptions apodictiques* de la connaissance. En voulant fonder la science objective Husserl fonde une

nouvelle science, la philosophie rigoureuse. Comme science des objets donnés d'avance, science des sources premières de la connaissance. Phénoménologie de la conscience immédiate des choses en elles mêmes.

Etude des phénomènes dans un contexte phénoménologique libre de tout présupposé métaphysiques, dans un contexte naturel. L'idée principale de Husserl sur la conscience s'avère l'intentionnalité*.

La phénoménologie transcendantale a eu une influence considérable. Heidegger* fut l'élève de Husserl. Bachelard*, Sartre*, Merleau-Ponty*, Lévinas* ont subi cette influence. La phénoménologie a eu une influence sur de nombreux courants philosophiques contemporains comme l'existentialisme*, l'herméneutique*, le personnalisme* et le structuralisme*. L'atmosphère phénoménologique a renouvelé la philosophie au XX^e siècle.

PHILOSOPHIE

PHILOSOPHIE ANALYTIQUE (Cf. Analytique-Philosophie)

PHILOSOPHIE CONTINENTALE (Cf. Continentale-Philosophie)

PHILOSOPHIE DE LA BIOLOGIE (Cf. Biologie-Philosophie de la)

PHILOSOPHIE DE LA CHIMIE

PHILOSOPHIE DES MATHÉMATIQUES

Au cours des siècles le caractère des mathématiques a changé et ceci n'est pas sans influence sur la philosophie des mathématiques, c'est à dire sur l'interprétation que l'on donne de la nature des objets mathématiques*. La philosophie grecque des mathématiques est largement influencée par le rôle dominant de la géométrie*. La philosophie moderne des mathématiques, dans un contexte où domine l'algèbre*, se focalise sur les relations entre les mathématiques et la logique*, et sur les problèmes de fondements des mathématiques*.

En ce qui concerne la nature des objets mathématiques* on distingue les philosophies réalistes* et les philosophies conventionnalistes*. Les ontologistes et les formalistes qui dominent alternativement le discours mathématique. Depuis David Hilbert* c'est l'approche formaliste qui prime à travers les développements des axiomatiques* et du structuralisme*. Les ontologistes comme A. Connes postulent l'existence d'une réalité mathématique préalable à l'élaboration des concepts.

Le réalisme mathématique*, comme tout réalisme*, soutient que les entités mathématiques existent indépendamment de l'esprit humain. Les mathématiques ne sont pas construites par l'esprit, mais sont découvertes par le mathématicien. Le réalisme mathématique* prend des formes différentes :

le platonisme, qui suggère que les entités mathématiques sont des réalités abstraites existant dans un monde idéal hors des sens,

le logicisme*, qui traduit tous les concepts de mathématique en termes logiques,

et l'empirisme*, pour lequel les objets mathématiques proviennent de découvertes expérimentales.

Dans le cadre du réalisme mathématique*, le structuralisme mathématique* substitue les structures* aux objets traditionnels (points, lignes, nombres..) ouvrant ainsi la voie à un réalisme structural*.

Le conventionnalisme* mathématique prétend que les symboles mathématiques ne renvoient à aucune entité réelle, mais sont des signes conventionnels qui ne désignent à priori aucune réalité transcendante ni extérieure, et qui sont liés entre eux par la cohérence des principes de déduction à partir de concepts et d'axiomes fondateurs. Les mathématiques sont une manipulation de signes* vides de sens et les vérités mathématiques sont purement formelles (formalisme*).

Tout comme le conventionnalisme* l'intuitionnisme* est anti-réaliste*, en soutenant que les objets mathématiques sont des formes à priori de notre esprit, en accord avec les conceptions kantienne. Il s'oppose ainsi au cognitivisme* autre forme d'anti-réalisme*, qui considère que notre esprit construit les objets mathématiques à partir de l'expérience sensible.

PHILOSOPHIE DE LA RELATIVITE GENERALE

La relativité générale est bien plus une théorie de la gravitation* qu'une théorie de la relativité. Une théorie non euclidienne de la gravitation. Elle met la gravitation sur le même plan que la mécanique ou l'électromagnétisme par l'emploi d'un langage géométrique unique, celui de l'espace-temps courbe.

Ceci se manifeste clairement par l'existence de nombreuses correspondances* caractérisant la théorie.

La relativité générale a deux types de correspondance avec la relativité restreinte. La première apparaît si le champ de gravitation s'évanouit partout (limite de la courbure nulle) on peut introduire un repère inertiel global ce qui restaure la relativité restreinte. La seconde est dans l'exigence du principe d'équivalence que localement il existe un repère inertiel où toutes les lois de la physique prennent leur forme de la relativité restreinte. Un champ de gravitation, traduit par la courbure de l'espace-temps, peut se réinterpréter au moyen d'une « correspondance locale » dans un espace euclidien tangent. Autrement dit, le passage des forces de gravitation aux forces d'inertie n'est pas un simple changement de point de vue qu'exprimerait une transformation particulière de coordonnées.

Dans la limite de champs gravitationnels faibles et de faibles vitesses la relativité générale se réduit à la théorie de la gravitation de Newton.

La relativité générale a le mérite de résoudre pour la gravitation le conflit entre action à distance et action par contact que la théorie du champ électromagnétique avait résolu pour l'électromagnétisme. Les dernières années du XIX^e siècle marquées par le triomphe de la théorie électromagnétique, laissent la théorie de la gravitation presque en dehors de la physique, dans un magnifique isolement. L'avènement de la relativité restreinte paraît aggraver les choses dans la mesure où la gravitation ne saurait se propager de manière instantanée, et où on ne voit pas pourquoi elle échapperait à l'invariance de Lorentz.

La simplicité et l'esthétique de la théorie d'Einstein, son caractère à la fois naturel et contraignant, des vérifications peu nombreuses mais significatives constituent des arguments suffisants en sa faveur. C'est ainsi que depuis 1916 la théorie d'Einstein représente, sans conteste, la voie inéluctable et royale, voie solitaire aussi, que doit emprunter toute explication satisfaisante de phénomènes de gravitation.

Le succès de la théorie est-il un argument suffisant en faveur de son réalisme ?

L'espace-temps courbe est-il une réalité physique ou un instrument de représentation ?

Einstein était un matérialiste convaincu, mais dans la phase de création de la relativité restreinte, sous l'influence sans doute de son ami mathématicien, Marcel Grossman, il pense que la physique ne prend son sens qu'à travers une expression mathématique adéquate. La richesse du monde n'apparaît qu'à travers la richesse du langage. Le statut de l'espace-temps courbe est d'être un véritable objet

physique, d'autant plus qu'il est la traduction mathématique de l'existence de masses matérielles dans l'univers.

Parti d'une idée généralisatrice -l'équivalence de tous les systèmes de coordonnées- Einstein aboutit à une version non euclidienne du monde. C'est elle qui se révèle « objective » au sens tout à fait usuel, où la perception, puis la théorie fondent une objectivité cohérente. Gaston Bachelard commente ainsi le rapport entre le possible et le réel dans la relativité : « Il semble ainsi que la possibilité, en une étrange réciproque, vienne sanctionner la réalité. Dans les doctrines de la relativité plus que dans toute autre, l'affirmation d'une possibilité apparaît comme antérieure à l'affirmation d'une réalité ; le possible est alors le cadre à priori du réel. Et c'est le calcul qui place le réel dans sa véritable perspective au sein d'une possibilité coordonnée. L'esprit accepte alors une réalité qui est devenue une pièce de son propre jeu ». Mais n'est ce pas là la voie pour la conquête de toute objectivité* ?

Par delà ses vérifications expérimentales la théorie d'Einstein fournit les éléments architecturaux d'une vision du monde : elle procède d'une réflexion sur la généralisation du principe d'inertie et de relativité ; elle aboutit à une critique de la suprématie euclidienne et de sa nécessité ; elle introduit une parenté profonde entre les deux sortes de masses ; elle supprime d'apparentes disparités ; elle rattache le mouvement des masses aux seules propriétés du champ, effaçant ainsi d'apparentes coïncidences et les groupant en un ensemble corrélé. C'est cette architecture impressionnante qui est le meilleur argument en faveur de l'objectivité. L'objectivité de la physique passe par l'objectivité de sa représentation de l'espace –temps.

Et pourtant une interprétation géométrique des phénomènes de gravitation les isole profondément du reste de la physique, de l'électromagnétisme en particulier. En admettant la donnée d'un espace physique courbe, l'électromagnétisme décrit un champ* phénoménologique qui se propage dans cet espace courbe. Au contraire la gravitation est une manifestation de la courbure même de cet espace, même en la présence d'hypothétiques ondes gravitationnelles. Ainsi la relativité générale laisse encore subsister une profonde insatisfaction sur le chemin de l'unité* de la physique. C'est là la source des travaux ultérieurs d'Einstein pour la constitution d'une théorie unitaire, travaux qui n'ont pas abouti.

On peut cependant considérer que la relativité ne rompt pas avec l'idéal du mécanisme*, comme le fera plus tard la mécanique quantique*. On peut remarquer cependant que la relativité générale comme la mécanique quantique finissent d'une certaine façon par

remplacer l'éther par un cadre de référence qui leur sert à transmettre les interactions : l'espace-temps courbe et le vide quantique*. Mais en relativité générale on demeure dans une image du monde par figures et mouvements alors que la mécanique quantique par sa stratégie de la boîte noire introduit une démarche totalement nouvelle. Le raccord de ces deux théories exigera leur profond remaniement.

La physique moderne, si elle se défait des concepts métaphysiques, apporte d'un autre côté un nouveau concept qui assure la médiation entre la « matière* » et l'« espace vide* » : le concept de *champ**. Avec cet outil, il devient possible de construire « une pure physique du champ » en abandonnant l'idée d'un espace pré-constitué qui accueillerait ensuite la matière en son sein. La théorie de la relativité l'illustre pleinement car un des ses résultats remarquables est que les relations métriques de l'espace sont en même temps les relations qui décrivent le champ gravitationnel. Avant l'avènement de la théorie de la relativité, plusieurs tentatives de reconstruire la physique à partir de principes élémentaires différents avaient été esquissées. Hertz, dans ses *Principes de la mécanique* a construit la physique en effaçant le concept de force et en ne gardant que les concepts d'espace, de temps et de masse. Dans la théorie dite d'énergétique générale, le concept central est celui d'énergie, la masse inerte, ne s'y présentant que comme un facteur de capacité d'énergie cinétique. Pourtant, aucune de ces tentatives ne sera aussi fructueuse que la relativité générale. Pour expliquer ce succès, l'interprétation de l'égalité empirique entre la masse pesante et la masse inerte est un moment crucial. En effet, cette égalité était considérée comme un *fait* par Newton (donc comme une donnée qui aurait pu être autre) mais sera prise comme *principe* par Einstein ce qui lui permet de construire sa théorie physique, où il peut créer un champ gravitationnel par un simple changement de coordonnées. Sa réussite réside donc dans le dépassement du dualisme matière / espace à l'aide de ce concept de champ

PHILOSOPHIE DE LA RELATIVITE RESTREINTE

La relativité restreinte est une théorie dont le statut particulier a provoqué bien des discussions philosophiques accompagnées d'interprétation trompeuses. Au départ c'est une théorie qui ne prévoit pas de nouveaux effets spectaculaires, car elle s'installe sur une théorie déjà complète, l'électromagnétisme de Maxwell-Hertz. Il faudra attendre la physique nucléaire* et la physique des particules

élémentaires* pour voir se manifester des effets expérimentaux non négligeables.

Ces effets expérimentaux confortent le caractère objectif* de la relativité restreinte mis en doute par des interprétations subjectivistes* liées à l'utilisation du terme d'observateur* au lieu de celui de système de référence ou de repère inertiel*. Le concept de relativisme a donné lieu à toutes sortes de contresens qui n'ont même pas épargné certains physiciens.

Ce que la relativité restreinte proclame c'est la distinction entre les grandeurs absolues (intrinsèques) et les grandeurs apparentes (relatives) qui s'inscrit dans l'emploi d'outils mathématiques particuliers (vecteurs* et tenseurs*) au service d'une nouvelle géométrie* quadridimensionnelle. Le calcul tensoriel est l'instrument adapté à ce relativisme. Il permet de définir, en effet, une grandeur intrinsèque en examinant les propriétés de transformation de ses diverses caractéristiques telles qu'elles apparaissent dans les référentiels variés utilisés pour les décrire.

Une grandeur intrinsèque quelconque- scalaire, tenseur* ou vecteur*-est toujours invariante dans tous les systèmes de coordonnées. Elle conserve la même forme et reste indifférente à la référence. C'est la condition pour qu'une telle grandeur manifeste son aptitude à dépeindre l'objet*. L'objet * et ses caractéristiques sont explicités au moyen de la référence, mais non pas constitués par la référence. La référence permet de discerner l'invariance de l'objet sous la diversité de la relation. L'observateur peut choisir son mode de référence comme bon lui semble, la forme des équations sera toujours la même. C'est cette invariance qui confère à la théorie son objectivité.

La théorie de la relativité restreinte apporte à la physique non pas une véritable nouvelle notion ontologique de l'espace et du temps mais des exigences sur la formulation des problèmes d'espace temps qui ne seront pas sans conséquence sur les concepts de la physique. La formulation relativiste des théories aura pour conséquence inattendue d'introduire de nouveaux objets de la physique.

C'est ainsi que se produira la découverte de l'onde associée à un corpuscule ou onde de de Broglie*. La vitesse de phase d'une onde plane ne décrit pas un phénomène matériel.. La relativité restreinte indique que c'est une vitesse qui se transforme comme c^2 / v , v étant la vitesse effective d'un corpuscule attaché au repère mobile. On peut alors conférer une sorte de matérialité à cet objet dont on connaît le mode de transformation. De Broglie va supposer qu'à la propagation d'un corpuscule de vitesse v , on peut associer le mouvement d'une onde réelle dont la vitesse de phase est c^2 / v et la longueur d'onde $\lambda =$

h/mv . L'onde de de Broglie est entièrement déterminée au départ comme une possibilité relativiste. Cette possibilité va ouvrir des perspectives nouvelles à la microphysique puisqu'elle va inspirer Schrödinger dans le développement de la mécanique ondulatoire*. Elle se verra concrétisée par les expériences de diffraction de Davisson et Germer.

Quelques années plus tard c'est la formulation relativiste de l'équation fondamentale de la mécanique ondulatoire, la formulation de l'équation de Dirac, qui va conduire à une notion de vide (vide de Dirac*) peuplé d'antiparticules*. Les antiparticules sont le fruit d'exigences relativistes.

Quoique Einstein ne soit pas un kantien déclaré, la relativité restreinte n'est pas en opposition avec le kantisme* qui domine la pensée scientifique allemande au tournant du XX^e siècle.

Le mathématisme scientifique préconisé par Kant*, trouve son achèvement dans la relativité restreinte.

La réduction de l'objet à un système de relations est essentiel à la relativité comme à Kant*. Pour lui les propriétés des objets naturels ne représentent pas, en dépit de leur nom, les propriétés de ces objets en eux-mêmes, mais toujours une relation à un autre objet (y compris les organes des sens). La relativité, plus que tout autre théorie antérieure, abandonne la conception du savoir en tant que peinture du réel, pour adopter un point de vue fonctionnel. La vérité* à laquelle il accède s'obtient par les apparences, mais demeure cependant radicalement étrangère aux apparences.

Enfin l'espace et le temps représentent bien les catégories à priori de la perception. Le relativiste se préoccupe effectivement des conditions de sa mesure. Alors que les structures invariantes qui représentent l'objet en sont par définition affranchies. Tout l'effort de la relativité consiste même à détecter de telles structures indifférentes à l'observation et à la relation. Mais la relativité est bien loin du kantisme* dans toute son étendue.

Par contre la relativité restreinte vient concourir au débat positiviste* .

Pour un large public le résultat le plus spectaculaire de la relativité restreinte est le rejet de l'éther, incarnation de l'espace absolu, et le bannissement d'un temps universel et d'une totale simultanéité*. Toutes ces exclusions reposent sur un verdict de non observabilité*, rattachant ainsi la théorie aux doctrines du positivisme*, et cela d'autant plus qu'Einstein subit l'influence de

Mach*. Un certain nombre de démarches opérationnelles de la relativité restreinte ont été interprétées dans le sens d'une restriction de la théorie à des observables*, au même titre où l'on considérait que la thermodynamique se limitait à des observables alors que l'atomisme voulait expliquer le visible par l'invisible. Il faut limiter ce jugement d'autant plus que l'évolution ultérieure d'Einstein, en particulier dans sa critique de la mécanique quantique, a montré qu'il était essentiellement un réaliste*, refusant d'accepter la soumission de l'existence à la connaissance humaine.

L'importance de la relativité restreinte, théorie concernant au départ le monde macroscopique, n'est pas tant de bouleverser la physique classique, en opérant des regroupements et des liens inattendus entre l'espace et le temps, le champ électrique et le champ magnétique, la masse et l'énergie, mais d'avoir de par ses contraintes théoriques des conséquences fondamentales en microphysique. C'est d'ailleurs là que se manifestent les effets relativistes les plus spectaculaires.

Mais la conséquence la plus importante de la relativité restreinte est d'ouvrir la voie (en particulier par ses considérations géométriques) à la relativité générale* qui va en établissant un lien entre l'espace, le temps et la matière donner une nouvelle image de l'univers*.

Cassirer* explique le mérite d'Einstein par ce mot de Goethe : « Le plus grand art dans la vie mondaine et dans l'étude, consiste à retourner le problème en postulat, c'est ainsi que l'on parvient au succès. ». C'est ce qu'a fait Einstein en prenant comme postulat la constance de la vitesse de la lumière. La théorie de la relativité n'est donc pas née à partir de l'observation d'un certain nombre de faits mais elle a été le produit d'un changement radical de point de vue, d'« une réforme critique du système des concepts physiques fondamentaux ». Nous pouvons résumer la position de Cassirer ainsi : l'acquisition du savoir ne s'appuie pas seulement sur l'expérience mais aussi sur des innovations intellectuelles qui sont les purs produits de la pensée.

PHILOSOPHIE DES SAVANTS

De très nombreux savants ont de tous temps exprimé des idées philosophiques, sans pour autant devenir des philosophes comme c'est le cas de Descartes* ou Leibniz*. Une philosophie spontanée de savants qui influence en général leur démarche scientifique. Une vision du

monde engendrée par l'activité de constitution du savoir. Une idéologie* qui vient doubler la science.

Les thématiques envisagées participent de la culture philosophique générale et se prononcent sur des problèmes classiques et récurrents.

Helmholtz*, Boltzmann*, Hertz*, Mach*, Poincaré* et Duhem*.
Einstein, Bohr, Weyl Thom Prigogine d'Espagnat
Matérialisme dialectique

PHILOSOPHIE DES SCIENCES

La philosophie des sciences étudie la structure de la connaissance scientifique, les moyens et les méthodes du savoir scientifique, les procédés de fondation et de développement des sciences. Elle s'appuie d'une part sur les divers aspects de la théorie de la connaissance et d'autre part sur les matériaux que lui fournissent les différents ordres du savoir.

Son problème essentiel est le rapport entre le discours scientifique et une réalité* en soi, entre l'intelligence et le monde (adequatio rei et intellectu de la scholastique). Elle évolue dans un perpétuel débat entre le réalisme* et l'empirisme*.

La philosophie des sciences se constitue en discipline indépendante au milieu du XIX^e siècle (Whevell, J.S. Mill*). Elle se développe avec les travaux de Bolzano*, et de savants comme Helmholtz*, Boltzmann*, Hertz*, Mach*, Poincaré* et Duhem*. Vers la fin des années 20 du XX^e siècle elle est dominée par les conceptions du positivisme logique* qui sous l'influence de Mach* et des logiciens comme B. Russell* et L. Wittgenstein* privilégie l'analyse interne de la science en terme de rationalité logique (Schlick*, Carnap*, Cercle de Vienne*). Le positivisme logique considérait la science comme un système d'affirmations et de propositions décrivant les perceptions et les réflexions du sujet. Son problème fondamental consistait dans l'analyse logique du langage de la science avec pour but l'élimination des diverses propositions à caractère métaphysique*.

Le rationalisme critique de Karl Popper* prétend dépasser le positivisme logique* en prétendant qu'une théorie qui n'est réfutable* par aucun événement expérimental qui se puisse concevoir est dépourvue de caractère scientifique.

La naissance et le développement de la mécanique quantique ont donné lieu à des débats philosophiques sans précédent impliquant

différentes traditions philosophiques : kantisme* et néo-kantisme*, matérialisme dialectique*. On ne soulignera jamais assez combien la philosophie des sciences de la fin du XIX^e siècle et celle de la première moitié du XX^e siècle doivent à la tradition kantienne.

Vers la fin des années cinquante, accompagnant une critique du positivisme logique, apparaît un intérêt croissant pour l'étude du développement de la science dans ses cadres historiques et sociologiques. Cette période d'étude critique de la science et de ses méthodes est marquée par les conceptions méthodologiques de K. Popper*, la théorie des révolutions scientifiques de Kuhn*, le modèle historique du développement de la connaissance scientifique de S. Toulmin*, la conception des programmes* scientifiques de I. Lakatos*, la considération des styles scientifiques par A. Crombie*.

A la fin du XX^e siècle, les épistémologues ont reconnu qu'aucun des critères de scientificité (vérification, falsification*, programme* de recherche, anarchisme*) ne permettait de délimiter les sciences. Que ces critères puissent avoir valeur locale, il n'y a aucun doute, mais qu'ils déterminent en quoi reconnaître une démarche scientifique, ce n'est plus accepté dans sa généralité. De là à conclure que la science est juste une pratique sociale comme une autre, il n'y a qu'un pas, c'est ce qu'on appelle le « relativisme* », dans la mesure où toutes les pratiques peuvent se combiner.

Dans le dernier tiers du XX^e siècle la philosophie des sciences se renouvelle profondément sous l'influence de l'apparition de nouveaux savoirs qui enlèvent un peu à la physique son rôle de référence universelle : la biologie moléculaire*, la cybernétique* et la théorie générale des systèmes, l'informatique et la théorie de l'information*, la théorie qualitative des systèmes dynamiques* et les conceptions du hasard*, les sciences cognitives*, les sciences des systèmes complexes et l'intelligence artificielle*. La philosophie des sciences renoue avec des projets d'élaboration d'une philosophie naturelle*, tout en étant confrontée à une violente critique des certitudes de la science provoquée par les excès et les dérives du développement technologique. On assiste aussi à une institutionnalisation de la philosophie des sciences pratiquée par des philosophes et non plus par les savants et à une multiplication des recherches d'épistémologie spécifique (cognitivisme*, biologie*, cosmologie*.....).

Par ailleurs la philosophie des sciences a fort à faire avec la sociologie des sciences qui prétend la remplacer.

PHILOSOPHIE DE LA TECHNOLOGIE

La technologie est l'utilisation des méthodes de la science pour l'asservissement de la nature ou l'organisation de la production économique ou le développement des phénomènes sociaux. La technologie peut consister en dispositifs physiques ou chimiques ou en procédures pour la réalisation d'un objet ou d'une tâche. C'est la science des moyens techniques.

La philosophie de la technologie est un des champs significatifs de la philosophie contemporaine, fondé sur l'analyse du système complexe de la technique comme phénomène social dans le contexte historique de la civilisation. Elle est née de l'analyse des cultures matérielles dans la tradition philosophique classique et de l'analyse des connaissances liées aux développements techniques nouveaux dans les années 1960. La connaissance technique est considérée comme une connaissance d'objets spécifiques, les systèmes artificiels* qui se distinguent des objets naturels de la science. Objets dans lesquels se trouve formulée une finalité* au service d'un résultat pragmatique*.

La philosophie de la technologie n'a pas seulement un aspect méthodologique mais un aspect culturel multiforme. Une telle conception élargie des phénomènes techniques s'exprime dans la conception de « vision du monde technique » de Jacques Ellul*, où sous le terme de technique on entend non seulement l'activité des machines et des mécanismes mais aussi un style particulier de pensée rationaliste orientée vers l'opérationnelisme et l'instrumentalisme.

S'inspirant de la théorie générale des systèmes* de L. von Bertalanffy*, Ellul considère la technologie comme un système complexe autonome* le « système technicien » (1977). Autonome, cela veut dire qu'elle ne dépend finalement que d'elle-même, qu'elle trace son propre chemin, qu'elle est un facteur premier. Autonome signifie littéralement: qui suit sa propre loi. Le vivant est autonome; la loi de sa croissance et de son mouvement est en lui. Dire que la technique est autonome, c'est aussi dire qu'elle est une action, non une réaction. C'est le milieu sur lequel elle agit qui réagit à elle, qui s'adapte.

Dire que la technique constitue un système, c'est dire qu'elle est caractérisée par l'unité. Tout se tient. Pas d'élevage industriel sans antibiotiques. Mais là où l'élevage industriel est possible, l'élevage traditionnel n'est plus rentable. Pour rentabiliser l'élevage industriel, il faut par la sélection réduire la variété biologique. Cette réduction entraîne dans les troupeaux des séquelles qui rendent de nouveaux médicaments absolument nécessaires. Dans l'élevage industriel, le contrôle de la reproduction va de soi. Les vaches ne pourront donc plus vèler n'importe quand. Le débit de lait produit sera constant. Les cultivateurs qui auront survécu à la mutation ne vivront plus selon le

temps de la nature mais selon le temps réglé de la technique. La vie sociale en ressentira, il faudra des techniques d'intervention spécialisées pour réparer les bris dans l'homme. Tout cela rendra souhaitables une connaissance et une maîtrise plus grande des gènes, ceux des hommes comme ceux des animaux, chose réclamée aussi par les médecins, les employeurs, les policiers, les militaires et les banquiers...Génétique* et informatique* feront leur fusion. La transmission de l'information* par ordinateur facilitera la tâche des chercheurs travaillant à l'établissement de la carte du génome*. Manipulations génétiques d'un côté. Les vivants pourront être refaits de l'intérieur. De l'autre, au même moment, grâce à la chirurgie esthétique, assistée par les logiciels de traitement de l'image, modification de l'apparence extérieure. Les recherches en génétique et en médecine rendront possible l'élevage industriel du poisson, du saumon par exemple. Autre débouché pour les antibiotiques: tous les élevages. Et bientôt l'ensemble des mers et des océans: car les poissons d'élevage transmettent leurs nouvelles maladies à leurs homologues demeurés sauvages. On peut multiplier ces exemples à l'infini...

Le phénomène technique, dit Ellul, est la recherche en toutes choses de la méthode absolument la plus efficace. Voilà l'universalité. En toutes choses: partout et dans tous les domaines. Le réseau Internet est le symbole parfait de cette universalité géographique en même temps qu'il en est l'outil. L'universalité implique la substitution de rites et de symboles identiques à des rites et des symboles locaux. Le système technique est un univers qui se constitue lui-même en système symbolique.

Ellul avait compris, comme Debord, que la technique constitue elle-même le spectacle qui la légitime. C'est précisément la jonction entre les techniques du spectacle (dont font partie les nouvelles techniques de communication et d'information) et les techniques de production qui a rendu possibles l'encerclement et la réduction des derniers points de résistance à la technique. «Personne n'a pris le commandement du système technique pour arriver à un ordre social et humain correspondant. Les choses se sont faites, par la force des choses, parce que la prolifération des techniques médiatisée par les médias, par la communication, par l'universalisation des images, par le discours humain (changé), a fini par déborder tous les obstacles antérieurs, par les intégrer progressivement dans le processus lui-même, par encercler les points de résistance qui ont pour tendance de fondre, et cela sans qu'il y ait de réaction hostile ou de refus de la part de l'humain, parce que tout ce qui lui est dorénavant proposé d'une part dépasse infiniment toutes ses capacités de résistance (dans la

mesure où il ne comprend pas le plus souvent de quoi il s'agit), d'autre part est dorénavant muni d'une telle force de conviction et d'évidence que l'on ne voit vraiment pas au nom de quoi on s'opposerait. C'est l'apothéose du nouveau critère de vérité* apparu au XIV^e siècle. Avoir raison, c'est être vêtu de la technologie . S'opposer d'ailleurs à quoi? On ne sait plus, car le discours de captation, l'encerclement, ne contient aucune allusion à la moindre adaptation nécessaire de l'homme aux techniques nouvelles. Tout se passe comme si celles-ci étaient de l'ordre du spectacle, offert gratuitement à une foule heureuse et sans problème.

Le fondement méthodologique initial de la philosophie de la technologie se trouve dans le déterminisme* technologique caractérisant le rôle de la technique dans le processus social. Le déterminisme technologique est un espèce de système axiomatique fondé sur une série de postulats.

Postulat 1. La technologie a un développement autonome avec une logique propre, indépendante du contrôle socio-culturel, jusqu'au point de la considérer *causa sui**.

Postulat 2. Le développement de la technologie est un progrès technique et social.

Postulat 3. Le développement de la technologie a un caractère émergent*, indépendant des phénomènes sociaux, avec au contraire une grande influence sur ceux-ci, sur les transformations sociales et les modifications culturelles.

Contre les prétentions de la société technologique de nombreuses voix s'élèvent. Ellul dénonce le « bluff technologique ». Les mouvements anti-science* et anti-technicisme sollicitent l'attention. Le mouvement écologiste lance de nombreuses actions cherchant à contrecarrer l'emprise technologique sur la société. On dénonce une déshumanisation de la culture. On conteste l'art informatique. La société capitaliste leur oppose la liberté d'entreprise et la liberté d'innovation. La réalité technologique de la société contemporaine appartient à la culture masculine occidentale d'appropriation de la nature.

PHILOSOPHIE ET SCIENCE (Conceptions philosophiques de la science)

Si la philosophie des sciences* est un discours relativement récent, le discours de la philosophie sur le statut de la science est aussi ancien que Platon*. Celui-ci dans le *Théétète* met en scène Socrate qui se demande en quoi la science peut elle bien consister, et tout le

dialogue est consacré à cette question. Les philosophes ont porté sur la science un regard particulier qui s'apparente souvent à une épistémologie* sans être une épistémologie de sciences particulières. Un regard global sur la science et la valeur de la connaissance* qu'elle procure. Les philosophes ne se distinguent et ne s'opposent pas seulement par les réponses qu'ils apportent mais aussi et peut être même surtout par la manière dont ils soulèvent certains problèmes. Ces interrogations dépendent évidemment des conditions historiques ou sociales, voire politiques ou religieuses. Les distinctions entre philosophie des sciences*, épistémologie* et théorie de la connaissance* sont rarement clairement formulées. Sans parler de savoir ce que l'on considère comme science*. A vrai dire philosophie et science ont été longtemps indistinctes, tout au moins jusqu'au XVIIIème siècle. Diderot peut encore écrire que philosophie et science sont synonymes, tout en les distinguant clairement. L'une des raisons pour lesquelles la distinction entre science et philosophie s'affirme fortement au cours du XIXème siècle se trouve en Allemagne dans la domination exercée pendant un certain temps par l'idéalisme allemand*, suivie d'un retour au kantisme*.

Depuis Platon* la plupart des philosophes, et en particulier Aristote*, distinguent comme sciences des discours qui satisfont à certaines exigences démonstratives. L'arithmétique*, la géométrie*, l'astronomie*, la météorologie, la dioptrique* sont des sciences. Mais certains savoirs considérés comme science ont été abandonnés comme tels, la théologie* ou la chimie d'avant Lavoisier*.

La notion de « science » est mal dégagée dans la conscience grecque et c'est Platon qui va contribuer à l'émergence d'une notion indissociable de sa réflexion philosophique. On doit essentiellement à Platon un modèle mathématique de la science développé dans *La République*. Il oppose le caractère changeant des réalités visibles, qui ne peuvent faire l'objet que d'une opinion instable, et le caractère stable des réalités intelligibles, seules véritablement connaissables. Cette conception conduit Platon à valoriser les mathématiques. Les mathématiques peuvent fournir un modèle de la science parce qu'elles n'ont rien d'empirique. La science est considérée comme une forme d'idéalisme mathématique. La science platonicienne n'a pas pour finalité des applications pratiques. Elle n'a pas pour but de mathématiser le monde afin de l'expliquer et de le maîtriser. Elle a pour but de dégager les réalités intelligibles qui sont les principes ultimes de la réalité. La philosophie de Platon instaure ce que l'on appelle encore aujourd'hui le « platonisme » en mathématiques, c.à.d. la croyance dans l'existence d'entités mathématiques non pas

abstraites par l'esprit humain, mais indépendantes de lui. Platon est un réaliste*. Une réalité abstraite que la connaissance dévoile. L'opposé même du constructivisme*. L'idéalisme* platonicien détermine le cours de la science. Action claire de la philosophie sur la science. Platon est en quelque sorte le père de tous les structuralismes*.

La science moderne s'est construite pour l'essentiel par réaction contre la science scholastique héritée d'Aristote*. Pourtant la structure et les objets de la science sont en grande partie aujourd'hui ceux qu'Aristote a déterminé comme tels. Tout le langage de la science est marqué d'une manière essentielle par l'emploi de termes aristotéliens, retravaillés par la scholastique médiévale : puissance*, potentiel*, actuel*, substance*, propriété*, accident*, cause*, analogie*, matière*, forme*, essence* , genre, espèce, relation*, quantité, qualité*, place, infini*, vide*.

Aristote a mis en évidence qu'un discours scientifique devait être capable de démontrer ses affirmations et que c'est ce qui le distingue des autres discours sur la réalité. Ne négligeant pas l'observation de la nature, en y incluant le vivant, il considère la nature comme le véritable sujet du discours scientifique. Pourtant Aristote n'a jamais pratiqué l'expérimentation. Mais un ouvrage comme *La Physique* est un geste fondateur proclamant la nature empirique de la connaissance et la forme logique de son expression. La science est une aptitude à démontrer. Attitude qui lui est dictée par ses travaux sur la logique.

La conception aristotélienne va être relayée vers l'occident chrétien par les penseurs et les savants arabes. Ainsi Al Farabi, le second maître après Aristote, est considéré comme le précurseur de la scholastique. Il est connu pour ses commentaires des *Eléments* d'Euclide et de l'*Almageste* de Ptolémée. Il a écrit de nombreux commentaires sur l'œuvre d'Aristote. Al Farabi a eu une grande influence sur la science et la connaissance pendant des siècles.

Mais dans les discussions sur l'astronomie de Ptolémée va s'introduire le débat entre réalisme* et instrumentalisme*. L'opposition entre l'astronomie ptoléméenne et la physique est généralement conçue au XIII^e siècle dans les termes d'une opposition entre mouvements mathématiques et mouvements naturels. Opposition explicitement utilisée par Guillaume l'Anglais, médecin de Marseille, aux alentours de 1220, pour caractériser l'œuvre astronomique d'Al Bitruji.

Le simulacre* mathématique serait alors comme une seconde Nature. La vraie Nature et la Nature virtuelle. Le modèle* et le

simulacre*. Il faut reconnaître que la Nature virtuelle a d'éminents défenseurs.

Dans "Le Guide des Égarés" Maïmonide*, le plus célèbre des philosophes juifs du Moyen-âge, cantonne l'astronome dans le virtuel.

A l'instar de Maïmonide, Albert le Grand et Thomas d'Aquin*, les deux maîtres de la Scolastique et de l'Aristotélisme, défendent Ptolémée, dans un instrumentalisme modéré, en ce sens, que la théorie ptoléméenne (à la différence de la théorie "vraie" dont ils attendent la constitution future) n'est pas conçue comme un ensemble d'énoncés vrais, mais plutôt comme un ensemble de règles de construction des énoncés d'observation.

La science se détache progressivement de l'ensemble des activités au point de recevoir le nom d'arts libéraux.

C'est Cassiodore au VI^e siècle qui leur a donné leur structure. Cassiodore a développé le trivium, qui regroupait les disciplines littéraires :

- la grammaire,
- la rhétorique,
- la dialectique.

Son contemporain Boèce définit le contenu du quadrivium, ou quadruple voie, qui regroupait les disciplines scientifiques considérées comme pouvoir des nombres :

- l'arithmétique*,
- la géométrie*,
- l'astronomie*,
- la musique*.

Ainsi dès le Moyen- âge se mettent en place les conceptions de la science qui vont s'affronter au sujet de la science moderne.

Descartes* fut le premier philosophe à considérer la science dans sa globalité comme expression de la puissance de la raison humaine. A définir la science par la rationalité*. La science est un savoir certain n'admettant au nombre de ses propositions valides que celles dont on puisse assurer intuitivement la vérité ou que l'on puisse rapporter par une chaîne hypothético-déductive à des propositions dont la vérité est intuitivement perçue. Il y'a une profonde unité de la science qui s'exprime dans l'enchaînement des sciences particulières témoignant

de l'existence d'une racine métaphysique du savoir. La rationalité est au service d'un réalisme* profond, exigeant de la science de produire les vraies causes à l'œuvre dans la nature. Descartes définit en fait un véritable programme*. Le programme de Descartes assume l'héritage de Platon* et de Galilée* en instaurant le primat des mathématiques (la géométrie disait on alors). Dans ce but il identifie la matière et l'espace, la substance et l'étendue. Il est l'ancêtre des programmes géométriques contemporains.

Newton* se présente comme le champion de la méthode expérimentale en science, dans l'atmosphère anglaise des XVII^e XVIII^e siècles, où prévaut un esprit empirique dont les philosophes Locke* et Hume* sont les meilleurs représentants (empirisme*).

La fameuse déclaration de Newton « Hypothesis non fingo » (Je ne fais pas d'hypothèse) dirigée contre les cartésiens est la devise du programme de Newton que lui même appelait « philosophie expérimentale ». En fait Newton faisait tout autant d'hypothèses que Descartes, mais ce n'étaient pas les mêmes.

Le grand présupposé de tout le programme* de Newton a travers son invocation de l'expérience, est l'affirmation d'une philosophie réaliste* et substantialiste*. L'espace et le temps, les masses des corps et les forces qui agissent sur ces corps sont vrais, absolus.

Newton* veut donner de la nature la même image que les peintres de la Renaissance. L'image d'une réalité extérieure s'offrant à notre vision. Tout comme l'emploi de la perspective linéaire, l'absolutisation des concepts de la physique a pour but de donner une description naturaliste du monde. C'est là sans doute ce qui a imposé, au moins durant trois siècle, les canons esthétiques de la Renaissance. C'est là, ce qui a fait le succès du programme de Newton, sur deux siècles au moins, sous le nom de Mécanisme*. Le Monde, tel que nous le voyons et le représentons à l'aide de la Mathématique*.

Newton s'inscrit bien dans le courant empiriste* anglais, opposé au rationalisme* continental, et développé par Bacon, Hume*, Locke* et Berkeley*.

Leibniz*, en synthétisant l'ensemble des savoirs et des doctrines philosophiques antérieures, s'oppose à Newton* en ce qu'il est l'homme de principes. Pour lui la connaissance ne consiste pas à prendre acte de la réalité mais se trouve le résultat d'une construction mentale. Une telle conception peut être appelée constructiviste*. Elle

met le symbolisme* au cœur de la connaissance. Le constructivisme* de Leibniz s'oppose à l'empirisme* de Newton*.

Il part de principes fondamentaux sur lesquels il construit le discours théorique. Il utilise toute une architecture de principes :

le principe du meilleur : Dieu agit toujours pour le mieux.

Toutes les substances créées sont en harmonie entre elles.

le principe de raison suffisante : aucune chose n'existe jamais qu'il ne soit possible (du moins à un esprit omniscient) d'assigner pourquoi elle est plutôt que de n'être pas et pourquoi elle est telle plutôt qu'autrement. C'est un principe de nécessité physique.

le principe de continuité, la nature ne fait pas de sauts

le principe de non contradiction : rien ne peut être et ne pas être à la fois. C'est un principe de nécessité logique.

le primat logique du possible sur le réel, ce qui implique l'existence possible d'une multiplicité de mondes non contradictoires

le principe de l'identité des indiscernables : si deux objets ont les mêmes propriétés (intrinsèques et relationnelles) ils sont identiques, en particulier ils occupent la même partie d'espace temps. Autrement dit deux objets distincts ne peuvent avoir exactement les mêmes propriétés. Argument utilisé contre l'atomisme et l'espace absolu de Newton.

Leibniz ne part pas des atomes et du vide comme briques élémentaires. Ce sont des fictions utiles qu'il critiquera scientifiquement. Il part de principes fondamentaux sur lesquels il construit le discours théorique. Ses atomes à lui participent non pas d'un atomisme physique, mais d'un atomisme conceptuel. Des atomes métaphysiques, les fameuses monades. Leibniz construit les monades.

Leibniz ne croit pas au vide dont l'existence contrarie la perfection des desseins divins

Leibniz critique l'existence d'atomes rigides au nom du principe de continuité selon lequel la nature ne fait pas de sauts. Dans la collision de deux atomes rigides, leurs vitesses se renverseraient instantanément, ce qui est contraire à l'ordre et à l'harmonie.

Aussi Leibniz est-il le premier grand « théoricien », à la fois par son œuvre scientifique et par le programme scientifique qu'il propose. Il est le père fondateur d'un idéal scientifique que vont partager les physiciens contemporains dans leurs démarches axiomatisantes* et structuralistes*. Au couple antagoniste Platon/Aristote la science occidentale promeut au rang de nouveaux parents terribles le duo

Newton/Leibniz. Leibniz est le père d'un rationalisme baroque, qui assure le triomphe de l'illusion. Sa physique tout comme une partie de la physique contemporaine ne figure pas la réalité mais la fiction.

D'Alembert* et Diderot présentent leurs conceptions de la science dans *l'Encyclopédie*. Ils se veulent rationalistes* et empiristes*. Ils critiquent les philosophies rationalistes du siècle précédent, insuffisamment éclairées par les observations expérimentales. Chacun reconnaît, dans la mesure où toutes nos connaissances nous viennent des sens, qu'il faut accorder la philosophie rationnelle avec la philosophie expérimentale, mais ne s'accordent pas sur la part qui doit revenir à chacune dans l'élaboration de la connaissance.

L'œuvre de Kant* est une tentative de conciliation de ces programmes scientifiques, qui tente de dépasser l'opposition entre rationalisme* et empirisme*, dans une démarche dite transcendantale*, fondée sur la notion de connaissance à priori. Mais Kant pose les limites de la science dans sa célèbre distinction entre noumènes* et phénomènes. A la base de la philosophie de Kant se trouve l'idée de l'opposition entre le monde des choses* et le monde des phénomènes*. Kant niait la possibilité de connaître l'essence des choses, la possibilité de connaître « les choses en soi ». Il supposait que l'intelligence prenant connaissance du monde des phénomènes exprime le matériel obtenu sous une forme sensible logique.

Kant considérait les concepts d'espace* et de temps* comme purement subjectifs. Selon lui ces concepts résultent d'une capacité particulière de l'esprit humain à exprimer le monde des phénomènes dans des formes logiques définies. L'espace et le temps ne sont rien d'autre que les formes à priori de la perception sensible, précédant toute connaissance expérimentale. En d'autres termes, l'espace et le temps, au lieu d'être des attributs* inhérents aux objets de notre connaissance, sont des éléments de notre connaissance elle-même, considérée indépendamment de ses objets ; ils sont des intuitions* pures ; ils sont des données à priori de notre connaissance. L'espace et le temps ne sont pas considérés comme les objets mais comme les conditions du savoir. Ils représentent des schémas de connexion selon la coexistence ou la succession. Ces idées interviennent de manière active dans les considérations fameuses de Kant sur l'analytique et le synthétique*, l'a priori et le posteriori*.

Kant fonde ainsi ce qu'il nommera la philosophie transcendantale* qui porte non sur les objets mais sur notre manière de les connaître.

La « révolution copernicienne » opérée par Kant a pour conséquence que c'est « nous » mêmes qui introduisons l'ordre et la régularité dans les phénomènes, que nous nommons nature*.

La philosophie critique (le criticisme) de Kant est une tentative de conciliation du rationalisme* et de l'empirisme* par la limitation du champ de notre connaissance aux objets d'expérience. En mettant au premier plan le rôle actif de l'esprit dans le processus de connaissance, la philosophie de Kant est une des principales sources de l'anti-réalisme* moderne. Kant affirme que les objets de notre connaissance ne sont que des apparences et que « la chose en soi » est inconnaissable. Les objets empiriques ou les apparences ne sont que des représentations* et n'ont pas d'existence en eux même. Le kantisme est une forme de phénoménalisme* et une variété de fictionnalisme* (« Philosophie du comme si* »). L'influence de Kant a été considérable sur toutes les philosophies de la connaissance postérieures et forme ce que l'on appelle le « kantisme* ».

Mach* a développé une conception positiviste* des sciences, en les considérant comme des descriptions de ce qui est observable et non pas comme des explications. Ses positions philosophiques ont eu une influence considérable sur tous les physiciens du début du XX^e siècle, Einstein* compris. Il peut être considéré comme le fondateur de l'empirisme logique* (positivisme logique) viennois. Sa position a été fortement attaquée par L. Boltzmann* et par V.I. Lénine (dans « Matérialisme et empiriocriticisme »).

Par son antiréalisme et son antimatérialisme, en ramenant la réalité à un complexe de sensations, il s'opposait à Helmholtz* pour lequel les sensations n'étaient pas des reflets fidèles des choses mais des symboles des choses. Pour Mach c'est la chose qui est une abstraction, un symbole de pensée.

Les travaux des logiciens comme Frege*, Russel*, Hilbert* et Gödel* sur les fondements des mathématiques ont eu une profonde influence sur les conceptions de la science.

Ainsi pour les empiristes logistes* comme pour d'autres philosophes du courant analytique*, la science n'est pas conçue comme une activité, ni comme une modalité particulière de la connaissance, mais comme un ensemble d'énoncés dont on interroge la structure logique et la signification. C'est le cas de Carnap* et de *La logique de la science**.

On n'en finirait pas de citer les conceptions de la science de différents philosophes modernes. Auguste Comte*, Husserl* et la phénoménologie*, Heidegger*(La science ne pense pas), Wittgenstein*,

Quine* et le naturalisme*, Bachelard*, et toutes les discussions modernes autour de la notion de révolution scientifique*.

PHILOSOPHIE ET SCIENCE (Influence de la philosophie sur la science)

Si les philosophes s'interrogent sur le statut de la science (Philosophie et science*) ou scrutent la science d'un point de vue philosophique (Philosophie des sciences*) les constructions de la science ne sont pas sans influences de la part de la philosophie * ou de l'idéologie*. Car dans l'élaboration du discours scientifique les faits expérimentaux ne s'organisent qu'à l'intérieur d'un discours théorique à priori* (thèse de Duhem-Quine*) qui puise sa consistance, explicitement ou implicitement dans des idées philosophiques.

En 1820, le danois Hans Christian Oerstedt* découvrit qu'une aiguille aimantée subissait une déviation si on la plaçait au voisinage d'un fil parcouru par un courant électrique. Etablissant la jonction entre magnétisme et électricité il ouvrait la voie à l'électromagnétisme*, science fondamentale de notre temps. Cette découverte n'est pas due au hasard. C'est l'aboutissement d'un programme de recherche largement inspiré par les conceptions philosophiques de Kant* et de Schelling*. Pour Kant, en effet, la matière devait être conçue comme la manifestation de deux « forces fondamentales » dont toutes les autres forces observables ne sont que des modifications. Schelling, dès la fin du XVIII^e siècle, avait repris et développé longuement cette idée, évoquant expressément la transformation des forces électriques en forces magnétiques. Toutes les forces en leur tréfonds, sont identiques ; la nature est une totalité dynamique au sein de laquelle s'opposent et se métamorphosent « forces positives » et « forces négatives ». Or Oerstedt avait un doctorat en philosophie et sa thèse était directement inspirée de Kant en faisant mention de sa dette envers son ami Schelling.

Einstein* a clairement exprimé sa dette aux idées philosophiques de Hume* et de Mach* dans sa percée de la relativité restreinte*. Ces auteurs proclamaient que nos concepts dépendent entièrement des sensations, des impressions de nos sens. Il ne peuvent pas représenter la réalité et sont fictifs s'ils concernent ce qui s'étend au-delà de nos sens. Ni Hume ni Mach ne pensaient que ce caractère fictif était un outil utilisable lors de la construction d'une théorie. Les concepts fictifs étaient des fausses représentations qu'il fallait éliminer ou tolérer si l'élimination était impossible. Einstein pensait au contraire qu'il ne fallait pas éliminer un tel concept. Sa présence indique l'arbitraire de notre théorie. Il peut être retenu tant que son caractère arbitraire est

reconnu et qu'il permet de ne pas introduire de fausses considérations. C'est ce qu'a fait Einstein au moment décisif de la découverte de la relativité restreinte. Il a reconnu que le concept traditionnel de la simultanéité des événements distants dans l'espace n'était pas établi par l'expérience ; son utilisation conduit tacitement à une fausse hypothèse, le caractère absolu de la simultanéité, son indépendance de l'état de mouvement de l'observateur. Aussi Einstein introduit-il un nouveau concept de simultanéité, relatif au mouvement de l'observateur, la dépendance des jugements de simultanéité des événements distants de l'état de mouvement de l'observateur.

La philosophie de Mach exerce une grande influence sur les fondements de la mécanique quantique*. Elle inspire en particulier la tendance à se limiter à des grandeurs directement observables. Quarante ans auparavant, avec la participation discrète de Mach lui-même, cette attitude a mené à la propagande de l'énergétisme*, selon lequel les observables et les grandeurs ayant un sens physique se réduisaient aux variations d'énergie dans les différents processus. A l'énergétisme s'opposait la théorie cinétique des gaz, si fertile, dans laquelle les coordonnées et les vitesses des molécules de gaz, quoique non observables pour chaque particule, devaient nécessairement être considérées comme des grandeurs définissant l'état du système. De la même manière au point de vue de Heisenberg*, défendant l'observabilité, peut être opposée la mécanique ondulatoire*, où la fonction d'onde est aussi peu soumise à la vérification expérimentale que les orbites individuelles des électrons dans la première théorie quantique de Bohr*. Alors que Heisenberg n'utilise avec précaution que des grandeurs observables expérimentalement, Schrödinger et dans une plus large mesure encore son prédécesseur De Broglie*, sortent hardiment des limites de l'expérience et construisent des formes ondulatoires qui s'avèrent hors d'atteinte de l'expérience et sont donc de ce fait métaphysiques*. Cette dualité a marqué toute l'histoire ultérieure de l'interprétation de la mécanique quantique, quoique le point de vue de Heisenberg ait été incorporé dans la présentation orthodoxe.

En s'opposant aux idées de Mach dans « *Matérialisme et empiriocriticisme* » Lénine* a ouvert la voie à l'attitude du matérialisme dialectique* vis-à-vis de la théorie quantique, entraînant par là des démarches scientifiques singulières de la part des scientifiques marxistes. Ceux-ci ont longtemps défendus des idées réalistes proches de celles de Louis de Broglie* dans sa maturité, et tenté d'élaborer des théories alternatives, fondées sur des variables cachées*.

Hermann Weyl*, le grand mathématicien, suivait de près les développements de la physique, en particulier ceux de la relativité. Son approche était basée sur la philosophie phénoménologique* d'Edmund Husserl*, et en particulier sur son essai de 1913, « *Ideen zu einer reinen Phänomenologie und phänomenologischen Philosophie. Erstes Buch: Allgemeine Einführung in die reine Phänomenologie* ».

PHILOSOPHIE NATURELLE

La Philosophie Naturelle ou philosophie de la Nature* entretient avec la Science des rapports qui ont varié au cours de l'histoire. Elle se présente comme un ensemble d'interprétations* spéculatives de la Nature*, considérée dans sa totalité, et fondées sur une généralisation des résultats de la Science. La révélation des grands principes qui gouvernent le monde dans son ensemble, tant le vivant que le non vivant. Elle cherche à établir de grandes unités : unité de l'homme et du monde, unité de la science et de la philosophie, unité de l'âme et de l'esprit, unité de l'être*.

Dans l'antiquité la Philosophie Naturelle se confondait avec la Science et se nommait Physique (Cf. Aristote*) dans la philosophie grecque. Les idées d'atomisme et d'ordre cosmique donnaient son unité à la vision de la nature.

Le Moyen Age donnera une importance considérable à une autre idée très ancienne, celle de la correspondance entre le Microcosme* (l'Homme) et le Macrocosme (l'Univers). Idée qui culminera à la Renaissance.

Depuis le XVII^e siècle la notion de philosophie naturelle se sépare de celle de science, tout en gardant avec elle des liens étroits. Ce n'est pas par hasard si l'œuvre de Newton qui formule les principes fondamentaux de la mécanique et de l'astronomie porte le titre de " *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* " (1686).

Au XVIII^e siècle certains philosophes personnifient la nature, en la présentant comme une force nécessaire, mais aveugle, cause universelle toute puissante. Cette idée, faisant écho au *De natura rerum de Lucrèce**, se trouve chez Diderot* ou dans le *Système de la nature* qui est l'ouvrage le plus célèbre de D'Holbach* et celui qui a exercé l'influence la plus profonde à la fois sur les Lumières* européennes (il a longtemps été attribué à Diderot, qui y a travaillé avec D'Holbach) mais aussi sur la formation de la pensée marxiste*.

On a désigné par Philosophie de la Nature un mouvement d'idées du début du XIX^e siècle en Allemagne, dont les représentants sont Schelling* et Hegel*. On cherche à expliquer toute la nature par un principe unique d'où l'on déduirait à priori les lois et les principes du monde. (Cf. Naturphilosophie*)

Des visions du monde comme celles véhiculées par le Mécanisme* ou par le Matérialisme* constituent des philosophies naturelles.

L'anti réalisme de Kant* et du kantisme* met au second plan la philosophie naturelle en promouvant une philosophie du sujet connaissant. Mais ce mouvement tend aujourd'hui à s'affaiblir, et on peut à juste titre se demander ce qui dans la science contemporaine peut fournir les principes d'une philosophie naturelle.

Il semble bien que ce qui distingue la vision du monde aujourd'hui de celle qui a si longtemps prévalu est dans la reconnaissance du rôle actif du désordre* dans la nature.

La science classique s'était constituée comme une doctrine de la régularité, de l'ordre*, de la simplicité, de la nécessité, incarnés dans le langage quantitatif des mathématiques. La science contemporaine se veut un discours sur l'irrégularité, le désordre*, la complexité*, la contingence*. Elle institue en fait une démarche qui à partir d'une description de plus en plus précise de l'ordre parfait (vibrations, ondes, synchronismes, milieux cristallins) et du désordre extrême (turbulence*, théories stochastiques et statistiques, chaos déterministe*) parvient à la conscience de ce que la nature exprime la plupart du temps une alliance subtile entre l'ordre et le désordre, la symétrie* et la brisure de symétrie*, le simple et le complexe. C'est à préciser les rapports dialectiques entre ces paradigmes extrêmes que s'emploie toute la physique contemporaine, du microscopique au macroscopique.

Ces questions et ces problèmes concernent notamment la signification des symétries, des brisures de symétries et de la complexité dans la nature et le monde du vivant, le statut des systèmes dynamiques*, des bifurcations* et du chaos*, les propriétés de stabilité et d'instabilité des structures ainsi que la nature des processus sous jacents à l'émergence des formes et à l'apparition de comportements coopératifs

La Physique Quantique, la Physique Non-Linéaire, la Physique Statistique, montrent que toute organisation s'accompagne de désorganisation et cherche à comprendre l'imbrication de ces concepts

élémentaires. Le hasard* prend des allures constructivistes* et la matière mal organisée* s'avère riche de possibilités insoupçonnées.

C'est dans ce cadre qu'il faut voir la prise en compte du rôle fondamental du frottement* et de la dissipation* dans les caractéristiques du mouvement, contrairement à la mécanique classique qui en excluant le frottement a pu construire un formalisme mathématique général, la mécanique hamiltonienne*.

Maints exemples illustrent comment la géométrie* et la topologie* fournissent une conception dynamique de la nature qui ne sépare plus de manière absolue le vivant de la matière dite inerte, l'ordre du désordre, le simple du complexe, le local du global, la stabilité de l'instabilité, le déterminisme* de l'indéterminisme*, le certain de l'aléatoire*. Le propos principal de toute philosophie naturelle est l'exploration des relations entre matière* et forme*, dans tous les domaines possibles. Le mode de pensée le plus apte à fournir le cadre d'un tel propos est la géométrie*, parce qu'elle a une vocation universelle.

Ces démarches s'insèrent dans une évolution des ontologies* fondamentales. A l'ontologie de la substance*, de la chose*, de la matière* ou de l'énergie* qui domine la pensée occidentale depuis plus de deux millénaires, succède une ontologie de l'absence de substrat. Une crise de l'image* qui envahit tous les domaines. La théorie des champs*, la mécanique quantique*, la théorie de l'information* et la théorie des systèmes dynamiques* sont toutes complices pour mettre au premier plan de notre vision du monde des concepts dématérialisés comme l'information* ou le processus*. Une théorie comme la théorie des catastrophes* prétend même rendre compte des formes* indépendamment de la nature matérielle du substrat, remplaçant une ontologie de la force par une ontologie de la forme.

On assiste à l'émergence d'une nouvelle intelligence de la nature sinon de la Pensée*.

La conception contemporaine d'un vide*, qui n'est pas une substance*, mais comme l'aurait dit Aristote, de par sa conception de s'inscrit parfaitement dans cette nouvelle ontologie dominante.

Les conceptions de la nature subissent aujourd'hui une influence très profonde des idées de la cybernétique*, de la théorie des systèmes*, de l'informatique* et de la théorie des systèmes dynamiques*. La relativité* et la mécanique quantique* s'inscrivent encore avec peine dans ce tableau réaliste*.

A la fin du XIX^e siècle la crise du Mécanisme* a favorisé l'établissement d'une philosophie naturelle fondée sur le primat du Langage*. C'est l'avènement d'un positivisme* universel, où l'on

cherche à trouver à l'intérieur du langage l'expression de grandes vérités ontologiques*.

Les mathématiques, avec la logique mathématique*, la théorie des ensembles*, la crise logiciste des fondements* et les axiomatisations* ; l'axiomatisation des probabilités* par Kolmogorov* ; la mécanique quantique avec son aspect formaliste ; le structuralisme* dans tous ses états, du Cercle de Vienne* à la linguistique structurale* ; les doctrines psychologiques ou psychanalytiques*, dans un immense effort platonicien*, insistent essentiellement sur les figures d'équilibre, l'organisation* et la structure*, les aspects relationnels, les invariants, les types et les archétypes* Les parties sont reconnues à partir de tout*, le tout se reconstitue comme la somme des parties. C'est une vision totalement linéaire du monde.

La fin de ce siècle et celui qui vient sont caractérisés par l'avènement du non-linéaire*, où le comportement du tout est qualitativement différent de celui de la somme des parties. Une redécouverte du temps* et un effort pour justifier l'apparition des formes* à l'intérieur des processus*.

PHOTOCHIMIE

PHOTODETECTION

Transformation d'un signal lumineux en un signal électrique. L'absorption de la lumière par la matière « libre » en général des électrons (effet photoélectrique*), qui par des processus multiples d'amplification, deviennent à l'origine d'un courant électrique mesurable. Il existe de nombreux photodétecteurs selon le type de matériau utilisé. Ce sont les photodétecteurs qui manifestent l'action du photon par un « clic » caractéristique.

PHOTOELECTRIQUE (EFFET)

Sous l'action de la lumière un matériau (en général un métal) émet des électrons. On peut aussi regrouper sous le nom d'effet photoélectrique tous les phénomènes électriques provoqués par l'action de la lumière sur un matériau.

La particularité de l'effet photoélectrique est de ne se produire qu'au dessus d'un certain seuil de fréquence dépendant du matériau et de se produire quasiment instantanément. Il ne dépend donc pas d'une accumulation continue d'énergie comme le prévoyait la théorie ondulatoire de la lumière. Einstein* a compris que ces lois étaient

explicables par l'hypothèse des quanta d'énergie dans l'interaction lumière-matière postulés par Planck*. Mais Einstein a supposé de plus que ces quanta correspondaient à une structure granulaire de la lumière, l'existence de ce que l'on appellera plus tard le photon*. L'énergie du photon ne dépend en effet que de la fréquence de la lumière (multipliée par la constante de Planck*). L'effet photoélectrique dépend donc de la fréquence du photon et non pas de l'intensité de la lumière et se produit dès qu'un photon est absorbé. C'est le nombre de photons qui dépend de l'intensité de la lumière à une fréquence donnée.

Expérience cruciale* s'il en est.

Dans cette affaire, Einstein n'a rien inventé, n'a pas écrit de nouvelles équations ; il s'est borné à introduire certains concepts et certaines hypothèses. Cela lui valut le prix Nobel. La même année, 1905, une démarche de même type le conduira à la théorie de la relativité restreinte*.

PHOTOGRAPHIE

PHOTOGRAPHIE INTERFERENTIELLE DE LIPPMAN

PHOTON

Le photon est un quantum* d'énergie du champ électromagnétique quantifié. En tant que tel il est un des éléments non pas constitutifs de la lumière mais phénoménologiques liés au dualisme onde-corpuscule*. Il participe à une dualité phénoménale et non pas à une dualité ontologique. La lumière n'est pas constituée de photons. Le photon est une observable* macroscopique.

Ceci est en accord avec toute la philosophie de la mécanique quantique selon laquelle une observable macroscopique n'a pas d'existence microscopique préalable à la mesure. Ou tout au moins on ne sait rien en dire.

La notion de photon s'est introduite à l'encontre des idées de Planck* par des considérations sur les fluctuations du rayonnement du corps noir dues à Einstein. La lumière se comporte thermodynamiquement comme un gaz de particules. Mais ce sont des particules étranges pouvant présenter des propriétés de corrélation quantique* observées expérimentalement par photodétection*. Pour certaines sources de lumière(ex. le rayonnement thermique) les

photons ne sont pas détectés comme arrivant au hasard (cas du laser*) mais comme arrivant groupés (bunching de Handbury et Twiss). On observe même des cas où la distance entre deux photons est bien moindre que lorsqu'ils arrivent au hasard (antibunching de Mandel Kimble et Dagenais). Des expériences menées avec des lames semiréfléchissantes indiquent que ce que l'on appelle photon passe d'un côté ou d'un autre mais jamais des deux côtés à la fois. Le photon ne se coupe pas en deux.

Une pratique courante consiste à considérer le photon comme une particule élémentaire, semblant lui donner ainsi un statut ontologique. Ceci instaure un atomisme* de la lumière. Etrange particule en nul lieu localisée et de masse au repos nulle. De spin 1 elle appartient aux bosons*. Le photon particule ne peut se trouver que dans deux états de spin avec comme projection sur la direction du mouvement +1 ou -1, ce qui correspond dans l'électrodynamique classique à la transversalité des ondes électromagnétiques.

Le spin ne peut avoir que deux directions : dans le sens du déplacement (photon gauche spin = 1) ou en sens contraire (photon droit spin = -1) .

Le photon droit est dans l'état $d\rangle$ et le photon gauche dans l'état $g\rangle$ (polarisation du photon*)

Une lumière polarisée circulairement à droite est constituée exclusivement de photons droits et idem pour la gauche.

Une lumière polarisée linéairement est constituée de 50% de photons droits et 50% de photons gauches.

Il n'existe aucun système inertiel par rapport auquel le photon soit au repos, et le photon ayant toujours la vitesse c manifeste une masse en mouvement de E/c^2 . C'est cette masse qui se manifeste dans des expériences cruciales comme l'effet photoélectrique* ou l'effet Compton*.

Le photon est le héros de nombreuses expériences contemporaines où l'on considère que l'on produit des photons un à un. Ces expériences donnent lieu à des discours où le métalanguage devoie la rigueur du formalisme quantique. Parler de vie et de mort d'un photon libre(Cf. Electrodynamique quantique dans une cavité*)

Le photon souffre de l'existence de deux discours. Un discours rigoureux dans le cadre de l'électrodynamique quantique*. Un discours chosifiant considérant le photon de manière ontologique comme une particule (dualisme onde-corpuscule*).

Le photon véritable puzzle scientifique n'est pas à mettre entre toutes les mains.

PHOTONIQUE

PHOTOSYNTHESE

PHYSICALISME

Le physicalisme est la prétention de ramener toutes les connaissances aux objets de la physique*. Le mécanisme* est une forme limitée de physicalisme dont l'échec s'est manifesté dans son incapacité à résoudre le problème de l'éther*. Le physicalisme ne se réduit pas au matérialisme*, car il a une vision plus large des constituants fondamentaux de l'univers. Le physicalisme est un naturalisme* extrême.

Le physicalisme est un réductionnisme* radical prônant l'unité de la science* sous la bannière de la physique. Une doctrine défendue par les membres du Cercle de Vienne* à partir de 1931. Ce réductionnisme constitue pour certains l'idéal rêvé de la science, mais la complexité du monde s'oppose à son libre accomplissement.

En particulier la description des événements psychiques en termes physicalistes est loin d'être acquise comme le montre bien par exemple le problème de la perception* de la couleur*, qui comporte clairement une partie physique et une partie psychique. A moins d'imaginer une future réduction du psychique au neurophysiologique.

La prétention du physicalisme peut sembler bien audacieuse alors que l'unité même de la physique n'est pas réalisée comme le prouvent abondamment les difficultés de raccord entre le classique et le quantique, le gravitationnel et le quantique..... ou les problèmes que posent les conceptions du temps*.

PHYSIQUE

Science des formes les plus simples et les plus générales du mouvement* et de l'interaction* des objets matériels. Elle étudie les particules élémentaires*, les noyaux* atomiques, les atomes* et les molécules*, les corps solides, les liquides, les gaz et les plasma ainsi que les champs* physiques (électromagnétisme* et acoustique*, gravitation*). On distingue une physique expérimentale, une physique théorique* et une physique mathématique*. Les lois de la physique constituent le fondement de toutes les sciences de la nature et sont à l'origine d'une grande partie de la technologie contemporaine. La physique est utilisée pour la mise en place d'une image physique du

monde*. De ce point de vue on distingue la physique classique* et la physique quantique*.

Alors que la physique peut sembler devoir être un discours réaliste* sur la substance* et ses transformations, elle s'est progressivement engagée, avec succès, dans un discours symbolique*. Ce fait a été reconnu rapidement par les grands physiciens allemands du XIX^e siècle, Helmholtz* et Hertz* et constitue le cœur de la réflexion épistémologique* sur la physique, en particulier depuis l'apparition de la mécanique quantique.

Le philosophe Husserl* a dans « *La crise des sciences européennes et la philosophie transcendantale* » minutieusement décrit la mathématisation de la nature, fondement de la révolution galiléenne*. C'est cette mathématisation qui fonde la physique. Il décrit comment les intuitions pures se transforment en de pures et simples formes numériques, en structures algébriques. Mais on ne calcule pas mécaniquement comme dans le calcul numérique habituel, on pense, on invente, on fait éventuellement de grandes découvertes-mais avec un déplacement inaperçu du sens, avec l'apparition d'un sens symbolique*.

Parmi les grands problèmes de la physique contemporaine citons :

La question de la croissance de l'entropie, l'irréversibilité* et la flèche du temps.

Le problème de l'interprétation* de la mécanique quantique non relativiste et des nouvelles applications possibles liées à l'information quantique* ou à la nanotechnologie*.

Les interrogations fondamentales liées à l'origine de la gravité* et aux tentatives de grande unification*, ainsi qu'aux souhaits de formulation d'une théorie quantique de la gravitation.

Le programme de la réduction du vivant au non vivant, c.à.d. l'explication par la physique (et la chimie) de l'origine de la vie*.

PHYSIQUE CLASSIQUE

On appelle physique classique l'ensemble des théories physiques validées jusqu'à la fin du XIX^e siècle, à savoir :

- la mécanique newtonienne, inventée par Newton vers 1666 et publiée en 1687, puis perfectionnée par des générations ultérieures de physiciens, notamment pour les besoins de la mécanique céleste.
- la théorie du champ électromagnétique, développée par Maxwell* en 1865 à partir du concept de champ introduit par

Faraday, puis reformulée par Lorentz* en 1895. Cette théorie inclut l'optique ondulatoire comme cas particulier.

- la thermodynamique, formalisée dans les années 1850 par Clausius, et une première version de la physique statistique : la théorie cinétique des gaz, développée par Maxwell* et Boltzmann*.

La dénomination « physique classique » a été introduite par opposition à la physique quantique, née des fruits de l'hypothèse des quanta introduite par Planck* en 1900.

L'idéal de la physique classique est dans une description réaliste* d'un univers de la substance* et de ses transformations, où les objets sont munis d'attributs* bien spécifiés. Cet idéal s'est trouvé contrecarré par l'échec de la conception de l'éther* et l'échec de la conception mécaniste de la structure du monde microphysique.

PHYSIQUE DES HAUTES ENERGIES

PHYSIQUE ET INFINI

L'infini mathématique a-t-il une existence physique ? Les modèles de l'univers ont-ils recours à cet infini ?

Il est curieux que dans toutes les branches de la physique autres que la cosmologie*, les infinis soient considérés comme indésirables, marquant en quelque sorte la limite de validité des théories qui les prédisent. Or, en cosmologie, le modèle "standard" (univers plat infini) stipule sans état d'âme un espace infini.

De quoi parlons nous ? L'infini n'est pas un nombre. L'infini est au départ une notion mathématique abstraite. L'infini de référence est la propriété de l'ensemble des nombres entiers selon laquelle tout nombre est suivi d'autres qui lui sont supérieurs. Ce caractère montre qu'il ne peut exister de nombre plus grand que tous les autres. En effet, si nous trouvions un tel objet «infini», ce ne serait pas un nombre puisqu'il n'admettrait pas de plus grands que lui-même.

Par conséquent, dire d'une certaine variable qu'elle a une valeur infinie constitue un abus de langage qui peut prêter à confusion, en faisant croire que l'infini peut être atteint alors qu'il n'en est rien. Par exemple, on sait que l'on ne peut pas diviser un nombre par zéro et on parlera à ce sujet, incorrectement, d'un «résultat infini». La proposition correcte est que dans une division plus le nombre par

lequel on divise est petit (en se rapprochant de 0 mais sans l'atteindre) plus le résultat de la division est grand. Numériquement, on sera limité par la capacité du moyen de calcul dont on dispose. Lorsqu'on essaye de calculer un nombre trop grand sur une calculette ou un ordinateur (par exemple «10 à la puissance 600» ou «1 divisé par 0») on obtient un message d'erreur.

Manipuler des puissances de cent, mille, voire des millions ou des milliards est mathématiquement correct. En revanche les nombres que de tels exposants impliquent *ne sont plus des nombres au sens de la physique*. L'un des plus grands nombres que la physique peut « produire » est le nombre d'atomes dans l'Univers, qui est de l'ordre de 10^{80} (donc avec un exposant de deux chiffres seulement). En revanche, imaginons un singe tapant au hasard sur une machine à écrire pouvant produire 100 symboles de façon équiprobable. Le nombre de textes différents de 500 000 signes que ce singe est « susceptible » (!) de composer peut s'écrire facilement comme $100^{500\,000}$ ou $10^{1\,000\,000}$ (avec un exposant de un million). Cependant un tel nombre n'a aucun rapport avec la réalité, de sorte qu'il serait *faux* de prétendre que ce singe est capable « à la longue » de produire le texte attendu (par exemple une œuvre de Shakespeare!). Multiplier le nombre de singes, augmenter la vitesse de frappe ou le temps disponible ne change rien au résultat.

La réalité veut que deux évènements ne soient jamais identiques, car leur définition exige une précision infinie, ce qui est impossible à réaliser en un temps inférieur à la durée de vie de l'univers. C'est ainsi que le retour de Poincaré* ne peut être qu'un éternel retour dans le voisinage d'un évènement.

Aristote avait raison lorsqu'il écartait l'existence d'un mouvement à l'infini dans le vide*, entraînant la non existence du vide et donc d'un mouvement sans frottement*. Il élimine l'infini par une procédure physique dont l'esprit est une « renormalisation* ». Il est frappant de voir toutes ces problématiques confluer. Pendant deux millénaires l'infini, l'espace, le vide, l'irréversibilité et le frottement, vont avoir partie mêlée dans la discussion philosophique et scientifique. Manifestation d'une unité profonde des représentations de l'univers.

Aristote met en place le cadre de toute pensée physique. Pour Aristote, l'infini c'est ce qui ne se laisse pas parcourir et n'a pas de limite. N'ayant pas de limite, il ne peut être déterminé et n'existe pas en soi. L'infini est la négation du fini. Aristote admettait la nécessité de

penser l'infini, mais il déniait toute existence physique ou mathématique à l'infini. Pour lui, le mathématicien a certes besoin d'envisager des grandeurs plus grandes, ou plus petites, que toute grandeur donnée, mais nullement de considérer des totalités infinies en acte, déterminées quoique non limitées. Si l'infini mathématique relève de la catégorie de la quantité, c'est seulement en tant qu'infini potentiel, c'est-à-dire quantité qui peut devenir toujours plus grande ou plus petite sans que jamais ce devenir ne se transforme en être. Cette victoire conceptuelle de l'infini potentiel sur l'infini actuel traversa les siècles pour parvenir jusqu'à nous. L'infini en acte existe mais il n'est pas nombrable. Il existe des ensembles d'infinis en acte que rien logiquement n'empêche de concevoir comme des tous achevés. Ainsi l'ensemble des entiers, une droite infinie, un segment comportent bien une infinités d'éléments conceptuellement parfaitement déterminés et saisissables.

Mais le cœur de toute la pensée physique contemporaine se trouve dans le refus de tout infini actuel dans la formulation, restrictive par elle-même, des modèles. Certaines constantes universelles* bloquent l'accès à l'infiniment grand ou à l'infiniment petit.

La relativité restreinte* empêche tout mouvement infiniment éloigné, en limitant la vitesse à la vitesse de la lumière c .

La théorie des quanta* empêche tout échange infiniment petit d'énergie en limitant ces échanges via la constante de Planck* h .

La cosmologie* oscille entre le monde clos d'Aristote et l'univers infini de Newton, en produisant des modèles d'univers fini sans bord comme « l'univers chiffonné » de J.P. Luminet. Et pourtant l'expansion de l'univers* s'accélère.

Chassez l'infini, il revient au galop. Il faut se protéger contre lui.

C'est ce qui advient en théorie classique du champ*, qui est un système avec un nombre infini de degrés de liberté. L'infini est la plaie de toutes les théories de champ, classique ou quantique. Le champ emprunte à l'espace sa notion de continu géométrique. Mais pourquoi ce modèle d'une "matière" (ether ou fluide) continue alors qu'un modèle atomistique n'introduirait aucune infinité ou aucun infinitésimal ? Non pas pour décrire une réalité effectivement continue, mais pour pouvoir utiliser les méthodes de calcul de l'analyse mathématique*. Pour pouvoir remplacer le calcul impraticable des sommes d'un nombre très grand d'éléments discrets par des intégrales* d'un nombre infini d'éléments infinitésimaux continus. L'infinité comme approximation d'un très grand nombre fini.

PHYSIQUE ET PHILOSOPHIE (Influence de la physique sur la philosophie)

PHYSIQUE LINEAIRE

PHYSIQUE NON LINEAIRE

PHYSIQUE NAIVE (Cf. Sens commun)

PHYSIQUE NUCLEAIRE

PHYSIQUE MATHEMATIQUE

La physique mathématique étudie les propriétés mathématiques des formulations de la physique sans égard à leur signification physique. Ainsi elle étudie l'existence et la nature des solutions des équations différentielles* qui découlent des descriptions locales de la physique. Elle étudie les objets et les langages de la physique comme expressions de mathématique pure. Ainsi les propriétés algébriques des groupes* de symétrie ou les propriétés géométriques des lois fondamentales. Elle cherche à établir une disjonction entre le sens* et la forme* pour étudier la forme pure. Mais la forme a souvent un sens physique ce qui brouille la distinction entre physique mathématique et physique théorique*. Car on se pose souvent la question de savoir si les structures mathématiques de la physique sont dans nos têtes ou dans la nature.

La physique mathématique est en passe de changer d'esprit, car les objets mathématiques utilisés par les physiciens changent. Le fait que de nombreux physiciens théoriciens soient obligés d'étudier les techniques de la topologie*, de la géométrie différentielle*, ou de la géométrie algébrique* conduit à une révolution dans l'enseignement de la physique mathématique. On peut entrevoir une nouvelle tendance, dans l'utilisation par exemple de formes différentielles pour la mécanique ou l'électromagnétisme. De la même manière que la résistance aux vecteurs*, aux tenseurs* et aux opérateurs* a été lentement surmontée, la résistance aux formes différentielles, aux espaces fibrés ou à la cohomologie* va diminuer et un nouveau style de physique mathématique va apparaître.

PHYSIQUE QUANTIQUE

La physique quantique est la physique des objets quantiques*. Elle nécessite de la part du physicien pour admettre la spécificité de la démarche un effort réel de dépaysement par rapport aux habitudes de

la physique classique. Elle pose d'ailleurs un problème difficile celui des rapports entre physique classique et physique quantique. Au premier abord celle-ci a besoin de celle là pour se développer en définissant la forme des opérateurs*_observables par correspondance Il faut écrire l'hamiltonien* classique du système pour pouvoir formuler la quantification* par la définition d'un hamiltonien quantique. La solution de l'équation de Schrödinger* dans le cas stationnaire est un problème aux fonctions propres et aux valeurs propres pour l'hamiltonien quantique.

Comment après cela renoncer à toute image classique en déclarant l'impossibilité de connaître l'objet quantique dans son être et la nécessité de se limiter à la connaissance que la mesure* offre de celui-ci ? Un agnosticisme* difficile à admettre et dont il faut pourtant se satisfaire. Avant la mesure il n'y a pas de position ou de moment, la particule n'est ni onde ni corpuscule. Et qu'est ce que cette mesure abstraite dont la M.Q. ne précise pas le caractère instrumental ?. Une mesure qui n'est pas décrite par l'équation de Schrödinger et qui s'avère un coup de force axiomatique que l'on baptise du joli nom de réduction de l'état*. Toute la M.Q. est un coup d'état permanent. On comprend que d'aucuns cherchent à limiter ces pratiques arbitraires que seul le résultat justifie.

Comment se satisfaire d'une situation où déterminisme* et indéterminisme se frôlent ?. On ne peut que constater le caractère instrumentaliste* et symbolique* de la M.Q. A force d'irréalisme un nouveau réalisme ?. Faut il s'en tenir là ?

L'histoire de la physique quantique est celle d'une tension incessante entre des faits expérimentaux appartenant à l'univers macroscopique et un langage descriptif qui s'enfonce dans l'abstraction. Une incapacité de plus en plus marquée à utiliser le langage de la physique classique en microphysique malgré tous les efforts en ce sens. La multiplication de signes d'un comportement étrange responsable d'une véritable « magie quantique* ».

PHYSIQUE THEORIQUE

La physique théorique est l'activité de la physique qui cherche à donner de la réalité expérimentale une formulation mathématique déductive à partir de principes fondamentaux. C'est un mode de connaissance de la nature qui construit des modèles mathématiques correspondant aux différents phénomènes naturels. Elle est plus

préoccupée de l'architecture conceptuelle du discours que de rigueur mathématique, ce qui est plutôt l'objet de la physique mathématique*. Il n'en reste pas moins que les mathématiques jouent en physique théorique un rôle considérable, ce qui est attesté par les nombreux travaux de pure mathématique qui trouvent une application en physique théorique.

Elle a deux aspects, soit celui d'une accumulation de théories formalisées à caractère plus ou moins phénoménologique, soit celui de théories axiomatisées, à caractère abstrait, étapes intermédiaires vers une théorie générale des systèmes physiques*.

PLANCK (CONSTANTE DE)

Constante physique fondamentale déterminant un vaste ensemble de phénomènes physiques pour lesquels le caractère discret de grandeurs ayant la dimension* d'une action* est essentiel. Ces phénomènes sont décrits par la Mécanique Quantique.

Cette constante h a été introduite par M. Planck* en 1900 dans son hypothèse des quanta* d'énergie échangés entre la matière et le rayonnement électromagnétique du corps noir*: $E=h\nu$. Elle a la dimension d'une action* et représente en quelque sorte un quantum* d'action. Lorsque l'action est grande devant la constante de Planck, le système est descriptible par la Mécanique Classique. Dans le cas contraire c'est le domaine de la Mécanique Quantique.

Il y'a différents points de vue sur la constante de Planck dans la mesure où celle-ci intervient dans toutes les procédures de quantification*. Ainsi h est parfois considérée comme un quantum de moment angulaire* puisque le moment angulaire de n'importe quel système, mesuré par rapport à n'importe quel choix particulier d'axe, est toujours un multiple entier de cette valeur.

La constante de Planck peut être considérée comme unité d'invariant adiabatique. Même si Planck ne l'a pas formulé ainsi, c'est ainsi que la constante h apparaît dans ses travaux et ce lien avec l'invariance adiabatique est une explication simple du fait que h a les dimensions d'une action. Quand Planck quantifie l'oscillateur : $E=nh\nu$, on peut dire (et ce changement n'est pas simplement formel !) qu'il écrit : $E/\nu = nh$. Autrement dit, il quantifie les valeurs d'un invariant adiabatique et il se conforme par avance au principe adiabatique d'Ehrenfest selon lequel on n'a pas le droit de quantifier n'importe quelle constante du mouvement, mais seulement une constante telle qu'une transformation infiniment lente ne puisse pas provoquer de transitions quantiques.

Mais comme le disait Einstein* : " Si quelqu'un vous dit qu'il sait ce que $E=hc/\lambda$ veut dire, dites lui que c'est un menteur".

PLANCK (Echelle de)

PLANETES

PLASMA

PLATONISME/ARISTOTELISME

On s'accorde à dire que la pensée occidentale est parcourue par deux grands courants qui se rattachent explicitement ou non aux idées fondamentales formulées par Platon* et par Aristote*, dans la mesure même ou l'on oppose l'un à l'autre. Le poète anglais Coleridge a été jusqu'à dire que chacun naît Platonicien ou Aristotélicien, exprimant par là que les doctrines de Platon et d'Aristote sont des formulations de deux attitudes naturelles et sans cesse renouvelées vis à vis du problème central de la philosophie et de la science : le rapport entre le sensible et l'intelligible, la matière et la forme, le matériel et l'immatériel, le réel et le langage.

Au dualisme* platonicien, séparant la matière* et la forme* (Idée) s'oppose le monisme* de la substance* dans l'hylémorphisme* aristotélicien.

La thèse centrale d'Aristote est le rejet des formes séparées platoniciennes : les formes doivent être inhérentes aux choses, elles font partie de la structure des objets et ne peuvent pas et ne peuvent pas plus exister en dehors d'eux que la matière qu'elles informent. Toute forme est donc en un sens la forme d'une chose concrète.

Dans la Métaphysique, Aristote s'exclame : « et puis il semblerait impossible que la substance fût séparée de ce dont elle est substance ; comment donc les Idées, qui sont les substances des choses, seraient elles séparées des choses ? ». Ce bon sens aristotélicien sera souvent de peu de poids face à la fascination du grand récit mythique fourni par le platonisme.

A l'idéalisme* platonicien, dévalorisant le sensible et la matière*, s'oppose le matérialisme* aristotélicien et sa valorisation du mouvement*.

A une conception « atomistique » du monde comme combinaison de formes élémentaires données à priori, qui sous tend la pensée

platonicienne, s'oppose une conception dynamique du monde, propre à la pensée aristotélicienne, une conception où la matière informe et le mouvement se conjuguent pour créer les formes.

La conception atomistique engage la pensée dans le problème du rapport entre le Tout* et les parties, c'est à dire dans les arcanes de la philosophie systémique*, qui met précisément l'atomisme en question, en soulevant les problématiques de l'émergentisme* et du structuralisme*.

Toute la culture du XX ème siècle est traversée par ces prises de position, délibérées ou contraintes, dans le débat entre le matériel et l'immatériel. Le siècle s'ouvre par la concrétisation de l'existence des atomes et par la disparition de tout support matériel (éther) pour les ondes électromagnétiques (la radio) dans la théorie de la relativité. L'atome donne à la Chimie un fondement qui l'exalte et va lui permettre au cours du siècle de s'accomplir dans les nombreux triomphes du molécularisme (polymères, produits de synthèse, biologie moléculaire). Mais l'atomisme lui même va être pris dans le flux de la dématérialisation qui envahit le siècle, depuis la mécanique quantique* jusqu'à la théorie de l'information, à travers le développement général des formalismes*. Une disparition de la matière au profit de la forme, de la substance au profit de l'information. Avec un développement des conceptions transcendantales* de l'objectivité*.

A ce platonisme universel du XX ème siècle, dont la révolution informatique concrétise l'esprit, s'oppose le développement de la théorie des systèmes dynamiques* non linéaires, qui révolutionne les conceptions sur l'apparition des formes dans la nature, des formes biologiques aux formes de la pensée envisagées par les sciences cognitives*. Alors que par ailleurs la conception des formes élémentaires est dominante dans toute la psychologie de ce siècle, depuis les entités mentales de Freud et les archétypes* de Jung, jusqu'aux conceptions de la théorie de la Gestalt.

Le Vide participe de toutes ces tensions dans sa condition d'état* quantique, de forme substantielle*, là où bien des physiciens aimeraient voir une substance*, possédant énergie et fluctuations comme attributs.

PLATONISME DANS LA PHILOSOPHIE DES MATHÉMATIQUES

PLI ET FRONCE

PNEUMA

POINT ET ETENDUE (DIALECTIQUE)**POLARISATION DE LA LUMIERE****POLARISATION DU VIDE****POLARISATION ELECTRIQUE****POLYMERE****POLYMERE BIOLOGIQUE**

Il existe quatre grandes classes de polymères* biologiques :

Les protéines* qui sont des assemblées d'acides aminés

Les acides nucléiques* qui sont des assemblées de nucléotides*.

Les lipides qui sont des assemblées d'acides gras

Les polysaccharides qui sont des assemblées de sucres.

Les polymères biologiques, comme tous les polymères, se présentent sous la forme d'un squelette formé de la répétition d'une même série de groupements chimiques, et de groupements latéraux porteurs de la diversité des polymères.

POSITION**POSITIVISME**

Auguste Comte disait que " le positif désigne le réel". Attitude épistémologique considérant la connaissance comme une description littérale de la réalité au moyen du langage. S'en tenir aux faits vérifiables par l'expérience et justifiables par la logique. Rejet de la philosophie spéculative et de la métaphysique. Attitude opposée au constructivisme*.

Toute affirmation sur les non observables*, comme les atomes ou les champs, qui va au delà de l'évidence empirique ou de l'inférence* logique n'a pas de sens et doit être éliminée du discours scientifique, à moins d'adopter une attitude instrumentaliste*.

POSITIVISME LOGIQUE (Cf. Empirisme logique).**POSITRON****POSSIBILISME**

Position philosophique opposée à l'actualisme*. Il y a des choses qui ne sont pas actuelles. L'actualité n'est pas une propriété ontologique* mais une relation*. Il n'y a pas nécessairement identité entre être et exister. Les dispositions* n'existent pas avant d'être révélées, mais n'en ont pas moins la qualité d'être.

POSSIBLE

La catégorie modale* du possible accompagne naturellement toute réflexion sur l'existence des objets et des événements effectivement réalisés. A l'unicité (la solitude pourrait on dire) de la chose, du fait ou de l'acte, elle adjoint une multiplicité de référence qui permet de justifier et d'analyser les conditions d'accès à la réalisation de tout fait particulier.

La catégorie du possible exprime la tendance objective à l'existence des phénomènes, en tenant compte des conditions qui permettent leur réalisation. Elle s'oppose à la catégorie de l'actuel* ou du réalisé qui exprime une existence effective.

On peut distinguer une possibilité abstraite (formelle, logique) et une possibilité réelle (concrète).

La possibilité abstraite, que d'aucuns désignent sans doute par le terme virtuel*, caractérise l'absence d'empêchements fondamentaux à la réalisation d'un phénomène, sans pour autant que les conditions nécessaires en soient réunies. Le virtuel est un fictif raisonnable et non pas un imaginaire délirant.

La possibilité réelle contient toutes les conditions nécessaires à sa réalisation. Elle est comme cachée et n'attend que d'être sollicitée pour se révéler. C'est la sans doute le sens de la puissance* aristotélicienne. Une variation des conditions générales peut déterminer la transformation d'une possibilité abstraite en une possibilité réelle. Le virtuel peut devenir potentiel.

On peut se demander si la mathématique* n'est pas précisément un langage qui permet de manipuler et de modéliser « l'espace de liberté » où s'incarne le possible des choses. La mathématique dans son autonomie est une exploration des possibles. La tâche de la physique est d'extraire l'acte unique de cet univers de la puissance*. Tout système physique réel doit provenir de la réduction des systèmes physiques possibles. La physique n'émerge des mathématiques qu'à travers des principes de sélection*. Les principes variationnels sont des principes de sélection. L'irréversibilité* (la flèche du temps) des comportements physique réels face à la réversibilité des lois mathématiques, se situe dans le passage à l'acte à partir de l'univers des possibles, grâce à un principe de sélection.

Il existe une liaison profonde entre l'irréversibilité et la forme*. La forme résulte d'un choix sans retour. Quant aux formes à priori de la connaissance, au sens kantien, elles cherchent à baliser l'univers des possibles. Elles ont partie liée avec la réversibilité, garantie de la liberté d'exploration. Le langage naturel, comme les mathématiques, explorent le monde des virtualités*, un monde où tout reste possible. Il n'est pas facile dans ce cadre là de rendre compte de la survenue de l'acte, génératrice d'une irréversibilité à laquelle le discours se résout mal. L'acte crée un sens (Flèche) et assure la signification* (Sens*). Au fait à établir des liaisons et des passages demeurant la première formulation d'un principe extrême n'appartient elle pas à Aristote :

« La nature réalise toujours la meilleure de toutes les possibilités »
(Traité du Ciel).

L'essence désigne tout ce qui appartient à la possibilité d'une chose. Donc on ne peut attribuer aux figures géométriques (puisque dans leur concept rien n'est pensé qui exprimerait une existence*) qu'une essence mais non une existence dans la nature. Dans l'univers leibnizien*, le principe de continuité servait à établir des liaisons et des passages entre les vérités de raison et les vérités de fait, et le principe du meilleur, permettait à l'intérieur du monde des essences et des possibles, de choisir quelles essences et quels possibles devaient passer à l'existence.

POSSIBLE (Cf. Evènement possible*)

POST-GENOMIQUE (Cf. Biologie postgénomique*)

POST-MODERNISME

Dénomination commune d'un ensemble d'attitudes et de démarches qui au XXème siècle semblent s'opposer au modernisme, identifié à une rationalité* incarnée par Descartes* Kant* et les Lumières*.

A la confiance dans le langage succéderait une défiance vis à vis du langage inaugurée par la psychanalyse*, prolongée par la mécanique quantique* et illustrée de manière multiforme dans les "sciences humaines" contemporaines. Cette défiance fait de la déconstruction* la devise de l'attitude post-moderniste.

Défiance issue souvent de l'analyse scientifique du langage (linguistique structurale*) qui a constitué la base de l'analyse de nombreuses activités humaines en ethnologie, psychologie, esthétique.... Une analyse des fondements qui débouche souvent sur une crise des fondements. Un anti-réalisme*, un rejet de la

connaissance comme représentation exacte de la réalité, conforté par l'analyse socio-critique de la science (constructivisme social*), une opposition à toutes les formes de matérialisme*.

Le post-modernisme considère (suggère) que les théories scientifiques sont des fictions ou des métaphores tout comme la littérature ou la mythologie. Des exercices de rhétorique*.

D'aucuns voient dans la Mécanique Quantique* et la Théorie Moderne des Systèmes Dynamiques* (avec sa conception du chaos*) une illustration du post-modernisme.

La société contemporaine vit un tournant radical de civilisation, où se développe un idéal de civilisation globale comme complexe planétaire unique, fondé sur une diversité ethno culturelle et un polycentisme de l'organisation. Cet idéal suppose un rejet de la présomption de progrès linéaire, fondé sur l'unification des voies et des formes de développement.. Aujourd'hui l'idée de non-linéarité* prévaut dans les sciences de la nature comme dans les sciences humaines. Ecriture non linéaire, temporalité non linéaire, modèles non linéaires de la dynamique de l'inconscient...Un nouveau type de dynamique apparaît faisant appel à la non linéarité, à l'auto-organisation* et au chaos*. Une vision s'impose, celle des systèmes complexes*.

L'époque post-moderne voit l'arrivée en force de concepts difficiles à rattacher directement à la matière et à l'énergie, concepts clés de l'époque moderne. Ceci est lié à un changement fondamental de la technologie : c'est le transport des signaux qui remplace progressivement le transport de la matière. La croissance multiforme de la notion d'information* correspond à cette évolution. L'information est le concept central de la science post-moderne

Les principaux représentants de ce mouvement philosophique sont surtout français : Barthes, Bataille, Baudrillard, Deleuze*, Derrida*, Guattari, Kristeva, Lyotard, Merleau-Ponty*, Foucault. Plusieurs fois utilisé depuis 1917, le terme a reçu une acception de catégorie philosophique chez J.F. Lyotard en 1979 dans « *La condition post-moderne* » :

« Cette étude a pour objet la condition du savoir dans les sociétés les plus développées. On a décidé de la nommer post-moderne. Le mot est en usage sur le continent américain sous la plume de sociologues et de critiques. Il désigne l'état de la culture après les transformations qui ont affecté les règles des jeux de la science, de la littérature et des arts à partir de la fin du XIX^e siècle.

Notre hypothèse de travail est que le savoir change de statut en même temps que les sociétés entrent dans l'âge dit post industriel et les

cultures dans l'âge dit post moderne. Ce passage est commencé depuis au moins la fin des années 50, qui pour l'Europe marque la fin de sa reconstruction. »

On peut faire remonter le post-modernisme à Nietzsche*, mais il s'avère surtout un post-structuralisme*, une psychanalyse* structurale, un néomarxisme, une phénoménologie*, une sémiotique* et une linguistique structurale*.....

On rattache au post modernisme de très nombreux concepts et mouvement d'idées, avec toute une terminologie spécifique, au point que l'on a pu constituer un dictionnaire du post-modernisme.

Le post modernisme a été critiqué dans ses manières et ses méthodes lors du fameux canular de l'affaire Sokal, révélant l'usage métaphorique délirant des concepts ou des termes scientifiques, courant dans la littérature post-moderne.

POSTULAT

Le postulat se distingue de l'axiome en ce qu'il est une proposition que l'on avance sans preuves tout en n'excluant pas une démonstration ultérieure. Le postulat est très voisin de la conjecture ou de l'hypothèse.

Le postulat d'Euclide* sur la parallèle à une droite a pris un sens dans le cadre des géométries non euclidiennes*.

Les postulats de la mécanique quantique* font l'objet de nombreuses tentatives de démonstration à l'intérieur des approches logiques ou axiomatiques.

Postulats, conjectures ou hypothèses reflètent un certain état des connaissances dont l'évolution peut permettre leur démonstration.

POTENTIA

Mot latin signifiant la force* et désignant la puissance*.

POTENTIEL

Caractéristique d'un système exprimant ses comportements possibles sous l'action du monde extérieur. Que cette caractérisation entre dans le discours de la physique réintroduit contre toute attente la notion aristotélicienne de puissance*.

Ainsi l'énergie potentielle* exprime l'énergie qui se manifesterait pour un corps, lors d'un mouvement possible de par sa situation

Le potentiel est une caractéristique d'un champ vectoriel (champ de forces, champ des vitesses dans un fluide). Grandeur scalaire

fonction de l'espace (champ scalaire) telle que le champ en dérive par différentiation. Le champ est le gradient* du potentiel si celui-ci existe. Certains champs sont ainsi engendrés par un potentiel. Le potentiel n'est défini qu'à une constante près.

Dans la physique classique et dans la physique quantique les quantités mesurables (observables) sont l'intensité des champs de force. A première vue il semble que les champs de potentiel n'ont pas un sens physique direct, et sont introduits dans la théorie d'une manière purement technique, comme intermédiaires de calcul. Cependant, certains effets en mécanique quantique, comme l'effet Aharonov-Bohm*, font intervenir directement les potentiels comme grandeurs physiques. Tous ces effets ont une interprétation géométrique commune en terme de connexion* dans un fibré vectoriel sur l'espace temps (champ de jauge*)

POTENTIEL ELECTROSTATIQUE

Grandeur scalaire mesurant le rapport de l'énergie potentielle* d'une charge électrique placée en point d'un champ électrostatique*, à cette charge elle-même. Le champ électrique est le gradient* de ce champ scalaire. Cette fonction scalaire est souvent plus simple à déterminer que le champ électrostatique

POTENTIEL THERMODYNAMIQUE

Fonction du volume (V), de la pression (p) de la température (T) de l'entropie (S) du nombre de particules (N) et éventuellement d'autres paramètres macroscopiques, caractérisant l'état* d'un système thermodynamique. Les variations d'un potentiel thermodynamique représentent les variations d'énergie dans les conditions où se déroule la transformation du système.

Les principaux potentiels thermodynamiques sont l'énergie interne*(U), l'énergie libre* de Helmholtz* ($F=U-TS$), l'enthalpie* ($H=U+PV$), l'enthalpie libre* de Gibbs* ($G=H-TS$). Tous ces potentiels sont liés entre eux.

L'emploi des potentiels thermodynamiques a été élaboré par Gibbs* en 1874, et se trouve au cœur de la thermodynamique* car ces potentiels sont des conséquences directes des 1^{er} et second principe de la thermodynamique.

Ils contiennent aussi la théorie des systèmes hétérogènes à nombreuses composantes et à différentes phases*, et la théorie des

transitions de phase*, constituant ainsi les éléments de la thermodynamique chimique*.

La mécanique statistique* permet de calculer les potentiels thermodynamiques en considérant des systèmes à grand nombre de particules en interaction.

POTENTIEL VECTEUR

POUVOIR SEPARATEUR

PRAGMATIQUE

Partie de la sémiotique* qui s'attache aux rapports entre l'interprète-utilisateur et le système de signes qu'il emploie. C'est l'étude de l'usage du langage par opposition à l'étude du langage lui-même en tant que système. C'est la phase d'interprétation* d'une structure*. Cet usage est un phénomène complexe qui fait intervenir le contexte* d'énonciation. Une simple analyse sémantique* ne permet pas d'établir par exemple si l'usage est littéral* ou figuré*, métaphorique* ou symbolique*. Le sens littéral* est généralement considéré comme le sens d'une phrase interprétée hors contexte. Dans l'échange verbal nous communiquons beaucoup plus ce que nos mots signifient. L'usage des formes linguistiques produit en retour une inscription de l'usage dans le système lui même

PRAGMATISME

Doctrines sur la connaissance adoptée principalement par des philosophes américains à la suite de Charles Peirce*. Cette doctrine prend comme valeur ou critère de vérité d'un concept, l'efficacité de l'action qu'il permet. La connaissance est essentiellement un instrument pour l'action. Le pragmatisme est une valorisation du "Comme si". Le philosophe allemand Hans Vaihinger (1852-1933) a élaboré une philosophie du "Comme si" (Als ob en allemand, d'après Kant) où les sensations et les sentiments sont réels, mais où le reste de la connaissance humaine est constitué de "fictions*" pragmatiquement justifiées.

PRECIS ET IMPRECIS

PREDICTION

La prédiction, contrairement à la prévision*, ne suppose pas une observation préalable d'un phénomène. Elle suppose que le phénomène est connu par une loi, une formule, un discours logique.... Même si ces éléments de connaissance abstraits ont été obtenus à partir des résultats d'expériences passées. Ainsi dans l'extrapolation* la prédiction s'effectue en utilisant une loi établie grâce à l'observation partielle préalable du phénomène.

La prédiction suppose une connaissance du phénomène qui va au delà du stade documentaire et s'apparente en général à un niveau d'explication*. De nombreuses polémiques philosophiques tournent autour des affirmations : « Expliquer c'est prédire, ou prédire c'est expliquer ». La prédiction comporte en général une modélisation* ou une simulation*.

La prédiction permet souvent d'annoncer un évènement dans un phénomène sans avoir à observer ou calculer le déroulement complet du phénomène menant à l'évènement. Les astronomes peuvent ainsi prédire une éclipse à partir de l'expression mathématique des trajectoires des corps célestes fournies par les lois de la mécanique céleste, sans pour autant utiliser une image de ces trajectoires.

Pour les phénomènes de chaos déterministe* la prédiction en ce sens est par principe même interdite, puisque l'on ne peut en donner une formulation mathématique globale (non-intégrabilité*). Une prédiction faible peut cependant être faite en utilisant la loi qui permet en général d'engendrer à partir d'un point dans l'espace de phase*, le point suivant du phénomène.

Là où il n'y a pas de dire, il n'y a pas de prédire.

La prédiction suppose en effet une contraction de l'information pour décrire (dire) l'évènement. Cette contraction peut s'avérer difficile et même impossible ; c'est le chaos (déterministe) où la seule information réside dans l'évènement lui-même, toute prédiction devient impossible.

PREPARATION (dans un état)

En mécanique quantique la préparation est l'ensemble des conditions expérimentales macroscopiques qui permettent d'associer un état* à un système microphysique . Cette association est indirecte (à travers l'équation de Schrödinger) car elle relève de la stratégie de la boîte noire* dont elle constitue la définition de l'entrée et de l'état*.

PREUVE

PREVISION

En un sens restreint (pour l'opposer à prédiction*) la prévision utilise l'expérience acquise, par l'observation en général, pour annoncer la survenue d'évènements analogues dans le futur. «Après la pluie le beau temps» est une prévision fondée sur l'observation.

La prévision suppose que l'on a pu disposer de nombreux échantillons d'un phénomène, et que l'on peut valablement penser qu'un de ces échantillons va se reproduire.

Dans le cas du lancer d'une pièce de monnaie ou d'un dé, on dispose bien de nombreuses observations. Mais ces observations ne sont pas identifiables avec suffisamment de précision par leurs conditions initiales. La sensibilité aux conditions initiales caractéristiques de ces phénomènes pseudo-aléatoires*, bloque toute tentative de prévision véritable. A moins de se contenter d'une prévision probabiliste* ou d'une prévision à court terme selon la précision des conditions initiales, comme c'est sans doute le cas en météorologie.

PRINCIPE

PRINCIPE DE COMPLEMENTARITE (Cf. Complémentarité*)

Un des principes essentiels de la mécanique formulé en 1927 par Niels Bohr*. Selon ce principe, pour la description complète d'un phénomène quantique, il est nécessaire d'utiliser un choix de deux concepts classiques qui s'excluent (complémentaires), mais dont l'ensemble donne une information complète sur le phénomène global. Ainsi en mécanique quantique les images spatio-temporelle et énergie-impulsion sont complémentaires, car l'impulsion est liée à l'onde de de Broglie*.

Autrement dit, l'obtention d'information expérimentale sur une grandeur physique classique avec laquelle on veut décrire un objet quantique* est nécessairement liée à une perte de l'information sur une autre grandeur, dite complémentaire. C'est le cas pour la position et l'impulsion. En mécanique quantique ces grandeurs observables

complémentaires sont représentées par des opérateurs* qui ne commutent pas.

Contrairement à une affirmation répétée cette perte d'information n'est pas due à une perturbation incontrôlée de l'objet par l'appareil de mesure, car on ne sait rien de l'objet lui-même (qui se trouve dans une boîte noire*). Elle est contenue dans la « préparation* » de l'objet dans un état* qui nécessite effectivement des appareils de mesure. Ceci apparaît clairement dans les relations d'incertitude de Heisenberg* où l'incertitude concerne des mesures distinctes sur des copies du même état et non pas une mesure conjointe sur un état.

Le principe de complémentarité est devenu le noyau de l'interprétation de Copenhague* de la mécanique quantique

Ce principe était considéré par Bohr comme très général. On a essayé de l'appliquer à la psychologie, à la biologie, à l'ethnographie, à la linguistique et même à la littérature.

PRINCIPE DE CORRESPONDANCE

La physique contemporaine a attiré l'attention sur les conditions dans lesquelles, lorsqu'une théorie* en remplace une autre, l'ancienne théorie reste une bonne approximation de la réalité décrite par l'autre. C'est le problème général du rapport entre les théories, et du fait qu'une théorie ne contredit pas l'autre. Une des théories exprime l'autre dans son formalisme à l'aide d'un passage à la limite. C'est un problème d'histoire* et de philosophie* des sciences.

Lorsque les interactions moléculaires sont faibles ou le gaz se trouve dilué dans un grand volume, la théorie des gaz parfaits continue à s'appliquer, et la loi de Mariotte ($pV=RT$) reste valable au dépens de lois plus générales où le second terme de l'équation est différent.

Lorsque le frottement* est faible la mécanique hamiltonienne* reste valable, comme c'est le cas pour le mouvement des planètes.

Lorsque les corps classiques se déplacent à des vitesses bien inférieures à celle de la lumière (qui est une constante) la mécanique classique* reste une bonne approximation de la mécanique relativiste*.

Lorsqu'un objet quantique* possède une action* bien supérieure à l'action correspondant à la constante de Planck* la mécanique classique* reste une bonne approximation de la mécanique

quantique*. C'est le cas lorsque l'on considère des états* du système caractérisés par un nombre quantique* principal élevé. Dans un tel cas l'oscillateur harmonique quantique* se réduit à l'oscillateur harmonique classique*. C'est là la limite classique de la mécanique quantique*. Une problématique souvent considérée à tort comme liée à une procédure où l'on ferait tendre la constante de Planck vers zéro. La constante de Planck est une constante de la nature et non un paramètre variable.

PRINCIPE D'EQUIVALENCE

PRINCIPE D'EXCLUSION DE PAULI

PRINCIPE D'INCERTITUDE DE HEISENBERG

PRINCIPES VARIATIONNELS DE LA PHYSIQUE (Cf. Variationnels* (Principes))

PRIVATION

PROBABILITE

La probabilité n'est pas une grandeur physique normale. Issue du sens commun*, pour tenter de conjurer les situations d'incertitude* que le bon sens désigne sous le nom de Hasard* ou de Chance*, elle peine à acquérir un statut d'universalité comparable par exemple à celui de la masse (de la matière) ou de l'énergie. Cette difficulté vient de ce que le concept de probabilité appartient d'abord à la théorie de la connaissance* et aux procédures d'induction*, avant de se risquer à rendre compte de régularités dans le hasard*. Formaliser le phénomène subjectif d'ignorance (La théorie des probabilités n'est autre que le sens commun* fait calcul, selon Laplace) pour tenter de lui conférer un statut d'objectivité, voilà le débat (souvent polémique et idéologique) auquel est confrontée la notion de probabilité, avec pour résultat une grande diversité de points de vue et de délicats travaux d'unification. C'est qu'il est souvent là bien difficile de démêler l'objectif* du subjectif, l'épistémique* de l'ontologique*. Difficile de répondre à l'obsédante question : « En quoi les jugements de probabilités sont-ils objectifs ? ». D'autant plus que des travaux de psychologie cognitive ont largement montré les

considérables distorsions entre les jugements effectifs en situation d'incertitude* et les prédictions des théories probabilistes.

A défaut d'entente sur l'interprétation du concept de probabilité, c'est à dire sur la désignation d'une référence*, il existe tout au moins dans le domaine classique un seul calcul des probabilités*, celui axiomatisé par Kolmogorov* (probabilités kolmogoroviennes*). Ce qui rassure sur le sens* du concept de probabilité, en définissant son mode de participation à un calcul. C'est un calcul de la probabilité des événements composés à partir de la donnée de la probabilité (mesure) d'évènements élémentaires, à condition de donner un sens à la notion d'indépendance* des évènements. La mécanique quantique introduit un nouveau calcul des probabilités, dit parfois calcul ondulatoire. (Cf. Probabilités quantique*)

Mais ces calculs de probabilités ne fournissent pas par eux mêmes une information sur l'origine du concept de probabilité. L'attribution de probabilités à des évènements élémentaires se fait par des procédures heuristiques*. Dans le cas classique il s'agit d'un décompte de possibilités* ou d'arguments de symétrie. Dans le cas quantique il s'agit de la règle de Born*. Mais la probabilité reste une grandeur contextuelle* dépendant pour un évènement du contexte des autres évènements possibles où on le situe.

PROBABILITE (Amplitude de)

PROBABILITE CONDITIONNELLE

PROBABILITE (Interprétation de la)

L'interprétation de la probabilité consiste à fournir une référence* au concept de probabilité*, ce qui implique plus ou moins des hypothèses sur l'origine, psychologique, physique ou mathématique du concept.

Parmi les principales interprétations des probabilités, on peut distinguer deux catégories, l'épistémique et le statistique.

Dans le point de vue épistémique on considère que la probabilité est assignée à un énoncé pour en mesurer le degré de fiabilité. On distingue essentiellement :

Les théories logiques (Keynes, Carnap*) : la probabilité d'un énoncé H en présence d'une évidence (certitude) C est le degré d'implication de H par C.

Les théories subjectives (Ramsay, de Finetti, Savage) : la probabilité subjective* d'un énoncé H est le degré de

croissance (confiance) qui s'y applique. Ces théories sont souvent dites bayésiennes*.

Dans le point de vue statistique (ontologique*) la probabilité d'un évènement doit être asymptotiquement égale à sa fréquence* d'apparition. On considère :

Les théories fréquentistes (Von Mises) . la probabilité y est définie comme le rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas possibles.

Les théories propensionnistes (Popper*). La probabilité y est définie comme une propension* ou disposition* du cas unique.

Quelle que soit l'interprétation choisie, la probabilité permet de gérer l'ignorance dans laquelle nous laisse le hasard*.

PROBABILITES KOLMOGOROVIENNES

PROBABILITES QUANTIQUES (Calcul ondulatoire des probabilités).

Dans le calcul des probabilités ordinaires, si deux évènements sont observables (mesurables), leur intersection (la survenue simultanée des deux évènements) l'est aussi. Il n'en est pas nécessairement ainsi en mécanique quantique* où la survenue simultanée de deux évènements individuellement observables n'est pas nécessairement observable (observables non-compatibles*), ce qui signifie que l'on ne peut attribuer de probabilité à l'évènement composé correspondant. C'est par exemple le cas pour l'observation simultanée de la position et de la vitesse d'une particule microphysique.

C'est la raison pour laquelle on considère que la mécanique quantique* est un calcul de probabilité différent du calcul classique, quoique tout à fait identique dans son esprit et dans sa signification physique de la notion de probabilité*. Dans ce calcul on n'opère pas directement sur les probabilités mais sur les amplitudes de probabilité* (fonction d'onde*). Ce calcul n'opère pas sur les probabilités mais sur les vecteurs d'état* dans un espace de Hilbert*. Le principe de superposition des états* implique que pour connaître la

probabilité conjointe de deux situations possibles indépendantes il faut additionner leurs états et non pas leurs probabilités. Ce qui équivaut à additionner les « ondes » et permet d'appeler le calcul des probabilités quantique un « calcul ondulatoire des probabilités ».

La différence essentielle entre le calcul de probabilité classique et le calcul de probabilité quantique est dans le type d'expériences et d'épreuves qu'ils formalisent.

En théorie classique les propriétés auxquelles on s'intéresse, sont explicitement inscrites sur les systèmes physiques. Elles sont en quelque sorte affichées par avance sous forme d'étiquettes. Ce sont des attributs*. L'objet les possède et se trouve réellement dans l'état qu'elles décrivent. Reste à en réaliser la combinatoire. Il n'est pas trop difficile dans ce cas de trouver des conditions générales d'expérience constituant un cadre unique pour une catégorie d'épreuves* où se manifestent tous les résultats possibles de l'expérience.

En théorie quantique les propriétés sont implicites et ne se manifestent que grâce à une mesure*. Ce sont des propriétés de réponse*. L'objet ne les possède pas et son état n'est qu'un état de connaissance* de l'observateur. Vu la diversité des dispositifs expérimentaux nécessaires pour révéler les diverses propriétés, il n'est pas en général possible de construire une catégorie d'épreuves unique embrassant toutes les situations expérimentales. Les observables non compatibles relèvent de catégorie d'épreuve différentes. Dans un autre vocabulaire c'est la même chose que ce que décrit la contextualité* en mécanique quantique

En théorie classique les observables sont en acte*. En théorie quantique les observables sont en puissance* et c'est la mesure* qui les fait passer (irréversiblement) en acte. Ceci entraîne l'existence de deux calculs de probabilité distincts, les probabilités kolmogoroviennes* et les probabilités quantiques, qui constituent deux paradigmes* structuralistes. Mais dans la mesure où ni dans l'un ni dans l'autre ne sont proposés d'explication sur l'origine des probabilités (Cf. Hasard*), ces systèmes axiomatiques posent le même problème que soulevait Simone de Beauvoir dans « Les Temps Modernes » en 1949 lorsqu'elle constatait à propos des « Structures élémentaires de la parenté » que

« Lévi-Strauss ne dit pas d'où proviennent les structures dont il décrit la logique ».

PROBABILITES (Théorie des, ou, Calcul des)

Le caractère essentiel du calcul des probabilités dans sa présentation axiomatique moderne due à Kolmogorov* est de distinguer clairement entre les événements élémentaires qui résultent d'un type d'expérience ou de phénomène et les événements observables (composés d'événements élémentaires) qui sont les seuls événements que la théorie va formaliser en les faisant entrer dans un calcul. Car tout le calcul des probabilités consiste à reconnaître des événements de base observables pour lesquels on sait donner à priori une mesure*(de probabilité) et à calculer les probabilités d'événements composés observables selon certaines règles qui préservent la possibilité d'attribuer des probabilités en combinant les probabilités des événements de base constituants. Dans ce cadre observer c'est mesurer. Ce qui ne se mesure pas est réputé non observable. Du point de vue mathématique la théorie de probabilité c'est la théorie mathématique de la mesure* avec en plus la notion d'indépendance*.

Ainsi de la connaissance des probabilités à priori d'obtenir pile ou face, déduira-t-on par exemple la probabilité d'obtenir une certaine succession de pile et face dans un nombre donné de répétitions de lancer de la pièce de monnaie. De la connaissance de la probabilité pour une molécule d'un gaz de se trouver en un point de l'espace, et de la probabilité d'avoir une vitesse donnée, on calculera la probabilité d'être en un point de l'espace avec une vitesse donnée.

Pour le calcul classique des probabilités les événements observables peuvent donner lieu à un certain nombre de combinaisons entre eux à l'aide des lois de combinaison de la théorie des ensembles* (réunion, intersection, complémentation). Ce sont ces combinaisons qui engendrent les événements observables composés. En particulier si deux événements sont observables (mesurables), leur intersection (la survenue simultanée des deux événements) l'est aussi. Il n'en est pas nécessairement ainsi en mécanique quantique* (Cf. Probabilités quantiques*)

PROBABILITE SUBJECTIVE

La probabilité subjective d'un événement unique est le degré de croyance en la réalisation de cet événement. Elle participe à la prise de décision rationnelle face à l'incertitude*.

Lorsque l'on évalue à 35% la probabilité pour qu'il pleuve demain, on envisage un seul demain. Ceci nous incite à sortir avec un parapluie.

A la différence de la probabilité objective qui observe des événements réalisés, la probabilité subjective concerne des événements probables.

Pour son évaluation la probabilité subjective implique souvent la connaissance d'une probabilité objective. Pour savoir s'il pleuvra demain il est bon de savoir s'il a plu les jours derniers. Durant l'été au Moyen-Orient, on sait qu'il ne pleuvra pas demain, puisqu'il ne pleut pas depuis plusieurs semaines. La probabilité subjective est dans nos têtes, mais celles-ci contiennent une connaissance* de la réalité*.

PROBABLE

Un évènement est dit probable lorsque nous nous attendons à ce qu'il se réalise. C'est une notion épistémique* liée à notre connaissance*.

PROBLEME MAL POSE

Un modèle mathématique d'un phénomène physique est un problème bien posé, s'il a une solution, si elle est unique et si la solution dépend d'une manière continue des données. Un problème mal posé est au contraire un problème où la solution n'est pas unique ou est très sensible aux données. La plupart des problèmes inverses* sont des problèmes mal posés.

Pendant longtemps les mathématiciens ont pensé que les problèmes mal posés ne pouvaient pas représenter des phénomènes réels. Mais de nombreux problèmes mathématiques classiques aux riches applications sont des problèmes mal posés.

PROBLEME INVERSE

Connaissant les causes* d'un phénomène on peut en général en déduire les manifestations ou les effets. Le problème inverse consiste à déterminer les causes à partir des résultats d'observation.

L'étude des propriétés de la matière à partir des figures de diffraction* est un problème inverse. Les diffractions des rayons X*, des électrons* et des neutrons* conduisent à des problèmes inverses. L'image que se fait cerveau d'un objet tridimensionnel à partir de l'image bi dimensionnelle sur la rétine, est un problème inverse.

La résolution des problèmes inverses est difficile parce que ce sont souvent des problèmes mal posés*.

PROCESSUS

PROCESSUS (Philosophie du)

PROCESSUS ALEATOIRE MARKOVIEN

PROCESSUS ALEATOIRE STATIONNAIRE

PRODUIT SCALAIRE (de vecteurs)

Le produit scalaire de deux vecteurs est le nombre obtenu en multipliant la longueur d'un des vecteurs par la longueur de la projection de l'autre sur le premier. C'est en fait le produit des longueurs des deux vecteurs par le cosinus de l'angle qu'ils définissent entre eux.

Si les deux vecteurs sont de même direction c'est simplement le produit des longueurs des vecteurs. Si les deux vecteurs sont perpendiculaires le produit scalaire est égal à zéro.

PRODUIT VECTORIEL (de vecteurs)

Le produit vectoriel de deux vecteurs est un vecteur perpendiculaire au plan des deux vecteurs. Sa longueur est égale au produit de la longueur d'un des vecteurs par la longueur de la projection du second sur l'axe perpendiculaire au premier. Soit le produit des deux longueurs par le sinus de l'angle qu'ils définissent entre eux.

PROGRAMME INFORMATIQUE

PROGRAMME D'ERLANGEN

Programme scientifique* mathématique formulé en 1872 par Félix Klein, qui avec le mathématicien norvégien Sophus Lie (Cf. Groupe de Lie*) est à l'origine du développement de la théorie des groupes*.

L'idée principale de ce programme consiste à considérer que l'objet de la géométrie* est le système des invariants d'un groupe* de transformations d'une variété* continue, et que les différents systèmes de géométrie se différencient par la structure du groupe impliqué.

Ainsi on peut mettre à la base de la géométrie euclidienne* l'ensemble des déplacements euclidiens, qui comporte deux groupes, celui des translations et celui des rotations, groupes de transformation ne modifiant pas la distance. La distance entre deux points, invariant de la géométrie euclidienne, peut être définie par le théorème de Pythagore comme l'hypoténuse du triangle rectangle dont les côtés sont les différences des coordonnées* cartésiennes des deux points.

Dans la géométrie euclidienne, deux figures géométriques qui se correspondent par une transformation de l'ensemble des déplacements euclidiens sont considérées comme égales. Les propriétés des figures ne dépendent pas de leur position dans l'espace.

Il existe des géométries plus complexes où les invariants sont de nature différente. Ainsi dans la géométrie projective* c'est la forme de la figure, c.a.d. les rapports entre les distances des points, qui est invariante (Homothétie*). Un triangle reste semblable à lui-même tout en changeant de taille.

L'objet de la géométrie est l'étude des propriétés invariantes des figures. Du point de vue de Klein ce qui importe en géométrie, ce sont les groupes de transformation et non les propriétés des figures qui sont secondaires.

Ce rôle fondamental des groupes s'avère essentiel en physique (Cf. Théorème de Noether*).

PROGRAMME SCIENTIFIQUE

Conception développée par I. Lakatos* selon laquelle une théorie scientifique se développe toujours à l'intérieur d'un programme. Différentes théories scientifiques peuvent se développer sur la base d'un même programme. Un programme correspond à une certaine vision du monde, et exprime souvent une pensée philosophique qui se prolonge des siècles durant, peut s'interrompre puis réapparaître. La mise en œuvre de ce programme s'accompagne ou non de la constitution d'écoles scientifiques. Un programme s'articule autour de paradigmes*. On peut se demander si les programmes scientifiques ne représentent pas des archétypes* cognitifs fondamentaux

L'antiquité n'a connu que trois programmes scientifiques :

Un programme mathématique mis en place par les Pythagoriciens et poli par Platon,

Deux programmes physiques :

Le programme atomiste (Démocrite)

Le programme continualiste (Aristote) qui dominera le Moyen Age

La science moderne des XVII^e et XVIII^e siècles connaîtra quatre programmes qui s'accordaient sur le point fondamental de considérer que tous les phénomènes de la nature sont complètement soumis aux lois de la mécanique.

Le programme de Descartes assume l'héritage de Platon* et de Galilée* en instaurant le primat des mathématiques (la géométrie disait on alors). Dans ce but il identifie la matière et l'espace, la substance et l'étendue. La physique d'Einstein qui réduit le réel au géométrique, poursuit et en quelque sorte réalise le vieux rêve de Descartes et de Platon. Mais ce faisant, Descartes introduit une nouvelle vision de la matière, comme dématérialisée. Une matière purement conceptuelle, une « res cogitans » (chose d'esprit), dont la mécanique quantique au XX ème siècle semble curieusement faire son profit. De l'atome d'hydrogène, elle ne connaît en effet que l'équation de Schrödinger de l'atome d'hydrogène. L'atome réduit à une formule mathématique. Circulez ! Il n'y a rien à voir. Ou plutôt la vision est devenue purement intellectuelle. Tant de siècles pour en arriver là. C'est la faute à Descartes et à sa conception de la vision privilégiant l'intelligible sur le sensible

Le programme atomiste ressurgit au XVII° siècle en particulier de par les efforts de Gassendi* pour faire connaître l'œuvre d'Epicure. .Il y a toujours dans le programme atomiste deux tendances : un atomisme philosophico-mathématique (peut on diviser infiniment l'espace ?) et un atomisme physique (peut on morceler indéfiniment la matière ?). En fait deux camps qui ne s'intéressent pas au même problème, l'un considérant le statut de l'invisible (l'espace) l'autre le statut du visible (la matière). Cette double tradition de l'atomisme se retrouvera au XX ème siècle, lorsque la physique se partagera entre théories corpusculaires et théories de champs, faute de savoir les concilier pleinement.

Le programme de Newton où domine la méthode expérimentale affirmant une philosophie réaliste* et substantialiste*. Le programme de Newton est un nouveau programme scientifique, qui va finir par dominer tous les autres programmes au milieu du XVIII ème siècle. Newton se présente comme le champion de la méthode expérimentale en science, dans l'atmosphère anglaise où prévaut un esprit empirique, dont les philosophes Locke* et Hume* sont les meilleurs représentants. Une philosophie anglaise à la mesure de l'essor industriel et de l'expansion impériale. Le fait expérimental comme fondement de toute science. L'affirmation d'une philosophie de la puissance visible. Le grand présumé de tout le programme de Newton, à travers son invocation de l'expérience, est l'affirmation d'une philosophie substantialiste du réel. L'espace et le temps, les masses des corps et les forces qui agissent sur ces corps sont vrais et absolus. Newton veut

donner de la nature la même image que les peintres de la Renaissance. L'image d'une réalité extérieure s'offrant à notre vision. Tout comme l'emploi de la perspective, l'absolutisation des concepts de la physique a pour but de donner une description naturaliste du monde. C'est là ce qui a imposé pendant trois siècles au moins les canons esthétiques de la Renaissance. C'est là ce qui a fait le succès du programme de Newton pendant près de deux siècles. Le monde tel que nous le voyons et le représentons à l'aide des mathématiques. Le monde tel qu'il est.

Le programme de Leibniz beaucoup plus spéculatif en promouvant un idéal scientifique que vont partager les physiciens théoriciens des XIX^e et XX^e siècles sous forme d'une physique des principes. Le programme de Leibniz cherche à unir Platon et Aristote. Leibniz est le père fondateur d'un idéal scientifique qui en fait le père incontestable de l'attitude structuraliste* et axiomatisante*. Le père d'un nouveau rationalisme* baroque, de par le rôle central attribué à la simulation*. L'idée fondamentale du Baroque, son principe universel d'explication s'énonce : « Tout se passe comme si ». Dans le monde mécaniste tout se passe comme si Dieu n'existait pas. Comme le théâtre baroque, la physique de Leibniz et la physique actuelle ne figurent pas la réalité mais la fiction. C'est le triomphe de l'illusion. Une illusion formaliste qui oppose Leibniz à Newton. Etre leibnizien, c'est avant tout opposer aux objectifs empiristes de description (éventuellement mathématique) un véritable projet théorique. Il s'agit non pas de représenter le monde mais de le construire (ou de le reconstruire). Une attitude délibérément constructiviste* opposée aux positivismes* de tout poil

L'œuvre de Kant* est une tentative de conciliation de ces programmes scientifiques, qui tente de dépasser l'opposition entre rationalisme* et empirisme*, dans une démarche dite transcendantale, fondée sur la notion de connaissance à priori*. Kant cherche surtout à concilier Newton* et Leibniz*, et ce faisant, à préciser les relations entre la mathématique* et la métaphysique*. Sa monadologie* physique est une application conjointe de la géométrie* et de la métaphysique* à la philosophie naturelle*. On y considère la question de savoir si l'on peut, et comment, accorder la géométrie fondée sur l'hypothèse de la divisibilité à l'infini de l'espace, avec la métaphysique qui part de l'hypothèse de l'existence d'éléments premiers simples et partant non divisibles. Bien sûr Leibniz était métaphysicien et Newton craignait la métaphysique. En fait il y avait entre les différents programmes scientifiques antagonistes un choc soulevant une tempête

de contradictions dans l'esprit des savants et des philosophes. Car en fait Leibniz comme Newton doivent être classés comme métaphysiciens quoiqu'appartenant à deux courants de la métaphysique, le point de vue de Descartes et des adeptes étant celui des mathématiciens. Leibniz et Newton défendaient une conception dynamique de la nature contre une conception mécanico-mathématique. Kant aurait voulu trouver un moyen pour concilier ces programmes où s'exprimaient deux conceptions différentes de la dynamique comme doctrine des forces ou comme géométrie de l'étendue.

Le XIX^e siècle développe ces programmes et en prépare de nouveaux qui s'épanouiront au XX^e siècle, avec en particulier l'apparition de la thermodynamique* et de la physique statistique* et le développement de l'électromagnétisme* autour de la notion de champ*. Mais la problématique de l'espace, du vide et de l'éther va provoquer le déclin du mécanisme* matérialiste et du réalisme* et susciter l'apparition d'un symbolisme* de plus en plus abstrait qui dominera le siècle suivant.

Le XX^e siècle connaît cinq programmes scientifiques de base.

Le programme atomistique et probabiliste qui se développe dans le cadre de la théorie des processus stochastiques et de la physique statistique. Entre l'atomisme et le hasard il y a toutes les marques d'une longue histoire commune, qui se renouvelle du fait du caractère novateur et fécond de l'emploi par Einstein* des fluctuations* comme révélateurs de structures granulaires. Structure atomique de la matière puis structure granulaire de la lumière.

Le programme mécanique qui après avoir semblé stagner a explosé à travers la théorie des systèmes dynamiques* et la physique non linéaire*. Développant les outils permettant l'étude des mouvements complexes, et de la complexité* en général, ce programme est le témoin d'un glissement d'intérêt du mouvement* vers les formes*, en particulier à partir des théories de l'auto organisation*.

Les programmes atomistique et mécanique s'entrecroisent fortement selon une tradition qui ne faiblit pas. Mais il y a encore bien du travail dans la perspective d'unification de ces deux programmes. En particulier la jonction entre probabilité et dynamique non linéaire

pose bien des problèmes même pour les systèmes à nombre fini de degrés de liberté.

Les difficultés dans l'application universelle de ces programmes donnent naissance à deux nouveaux programmes.

Le programme géométrique issu de l'électromagnétisme* et mûri par la relativité* envahit toute la science du microcosme au macrocosme. Le paradigme* central en est la concept de champ*. S'appuyant sur la géométrisation de la mécanique hamiltonienne* il développe une géométrisation de la physique*.

Le programme structuraliste, algébrico logique qui s'incarne dans la mécanique quantique* et porte au pinacle le paradigme de la linéarité. L'ensemble de la physique est irrigué par un programme, à cheval sur le programme géométrique, prônant l'emploi de la théorie des groupes* en s'appuyant sur le théorème de Noether*.

En marge de tous ces programmes la deuxième moitié du siècle met en place un programme aux prétentions englobantes et ontologiques très larges.

Le programme informationnel, qui proclame la nécessité de l'inscription matérielle de l'information*, tout en promouvant l'information au stade d'une ontologie universelle, selon la formule lapidaire de J.A. Wheeler* : « It from bit ». Ce programme s'inscrit largement dans l'idéologie* régnante de la société informatisée.

PROGRES SCIENTIFIQUE

La science est souvent distinguée des autres domaines de la culture humaine par sa nature progressive. Par contraste avec l'art, la religion, la philosophie, la morale ou la politique, il existe des critères normatifs pour identifier les améliorations et les avancées de la science.

La notion de progrès scientifique dépend cependant du champ dans lequel une évolution scientifique ou technique est considérée. Localement une avancée scientifique peut s'avérer un progrès tout en étant une récession sur un plan plus large. L'emploi de pesticides est un progrès dans la lutte de l'agriculture contre les parasites tout en s'avérant néfaste pour la santé humaine et l'environnement.

C'est que la notion de science peut renvoyer à une institution sociale, à des chercheurs, au processus de recherche, à la méthode de recherche et au savoir scientifique lui-même. Le concept de progrès varie selon le point de vue sur la science que l'on adopte. Aussi peut-on distinguer différents types de progrès : économique (l'augmentation des crédits pour la recherche), professionnel (l'élévation du statut des scientifiques et de leurs institutions académiques dans la société), éducatif (l'augmentation de l'habileté et de l'expertise des scientifiques), méthodique (l'invention de nouvelles méthodes et l'amélioration des instruments scientifiques), et cognitif (augmentation du savoir scientifique). Sans parler du rapport entre progrès scientifique avec le progrès technologique et le progrès social.

Plutôt qu'une accumulation des connaissances nouvelles on peut considérer le progrès comme une rationalisation, une unification ou une amélioration de l'explication scientifique* des connaissances. L'augmentation des connaissances phénoménologiques sur les particules élémentaires ne devient un progrès que lorsqu'elle permet la formulation de théories générales comme la théorie unifiée des interactions et des particules*.

PROPENSION (Propensity)

Dans le langage courant, une tendance, un penchant, une disposition*.

Dans la théorie des probabilités*(Cf. Probabilité-Interprétations de la*) la propension est une interprétation proposée par Popper* qui considère la probabilité comme une disposition* liée à l'objet individuel ou à la situation. C'est cette probabilité objective que l'on désigne parfois du nom de « chance », en la distinguant de la probabilité-fréquence. C'est là la même démarche que celle adoptée pour l'énergie potentielle* qui consiste à considérer comme attribut de l'objet des événements possibles liés au monde extérieur. La notion manque cependant de justification physique.

PROPORTION

Comparaison entre deux grandeurs, entre deux parties d'un même ensemble, entre la mesure d'une partie et la mesure du tout. Les proportions apparaissent déjà dans le Timée de Platon. En fait le langage des proportions est le langage dans lequel s'écrivent les mathématiques et leurs applications depuis l'Antiquité jusqu'au XVII^e siècle, jusqu'à ce que le langage des fonctions* vienne le supplanter. Ainsi, par exemple, il n'est pas dit que la circonférence d'un cercle s'exprime en fonction du rayon et encore moins que cette

circonférence soit égale au rayon multiplié par 2π , mais il est dit que les circonférences des cercles sont proportionnelles à leurs rayons. Il est aussi dit que la hauteur d'un son est proportionnelle à la longueur de la corde que l'on pince. Ce faisant toute propriété mathématique était exprimée sur le mode de la comparaison. Mais ce langage n'est pas limité aux seules mathématiques et le principe de comparaison qui le sous-tend peut être étendu en un principe philosophique plus général d'analogie*, voire d'harmonie*. Les proportions apparaissent alors dans tous les domaines du savoir, scientifiques ou philosophiques.

A la fin de la Renaissance et au début de l'Âge classique la théorie des proportions reste encore un instrument privilégié pour la résolution de nombreux problèmes d'algèbre.

Le concept de proportion déploie tout son potentiel pratique dans le développement d'une théorie de l'harmonie*. La théorie des proportions, qui est la science du rapport et non celle du nombre, s'ouvre sur un vaste champ de relations qui définissent canon et règle de beauté dans diverses disciplines artistiques. Il n'est pas nécessaire de rappeler le rôle que jouent les proportions dans les théories de l'harmonie musicale et dans celles des ordres architecturaux.

PROPOSITION

Une proposition est l'énoncé d'un jugement*. Elle forme un tout en un sens indécomposable. Sa décomposition en idées ou concepts est un produit tardif de la réflexion. L'existence de la proposition ne résulte pas de celle des idées qui la composent. Elle leur préexiste au contraire parce qu'elle leur donne leur raison d'être en leur assignant des fonctions. La logique des propositions inanalysées est la logique propositionnelle*. Avec celle de proposition se dégage la notion de valeur logique : la proposition est un énoncé pris en bloc susceptible de recevoir une valeur logique*.

PROPRIETE

On conviendra de nommer simplement propriété toute propriété relationnelle* ou extrinsèque* pour l'opposer à la propriété intrinsèque* ou attribut*. Mais une propriété peut être dispositionnelle* ou catégorique* selon qu'elle peut se manifester ou se manifester explicitement dans l'interaction avec un agent extérieur.

PROPRIETE CATEGORIQUE

Une propriété catégorique d'un objet est une propriété effectivement manifestée lors de l'interaction avec un objet extérieur.

PROPRIETE EXTRINSEQUE (Cf. Propriété)

PROPRIETE DISPOSITIONNELLE

Une propriété dispositionnelle est une affirmation de l'existence possible d'une propriété catégorique pourvu qu'on en fasse l'épreuve. Une disposition* est conditionnelle. Mais dans cet état de potentialité la propriété dispositionnelle prend le caractère d'un attribut, d'autant plus si l'on tente de la justifier par des qualités intrinsèques de l'objet. Ainsi la fragilité d'un vase peut s'expliquer par sa structure microscopique qui est en fait un attribut du vase. En l'absence de recours justificatif la propriété dispositionnelle a pour ambition de donner un caractère intrinsèque ontologique à l'existence d'une potentialité.

La physique fait un usage courant de propriétés dispositionnelles pour caractériser les matériaux ou les milieux. La fragilité, la solubilité, la conductivité, la transparence ...l'énergie potentielle, le puit de potentiel sont dans ce cas.

En mécanique quantique toutes les observables sont dispositionnelles ce qui est une manière de tenir un discours sur une réalité occultée dans la boîte noire* avant la mesure*.

Le caractère virtuel d'une propriété dispositionnelle semble devoir empêcher qu'elle puisse avoir une influence causale. C'est le problème de la vertu dormitive chez Molière. Mais les philosophes ne s'accordent pas sur ce sujet.

PROPRIETE INTRINSEQUE (Cf. Attribut*)

PROPRIETE RELATIONNELLE (Cf. Propriété*)

PROPRIETE DE REPONSE (Propriété contextuelle)

PROTEINES

Les protéines sont des polymères* d'acides aminés dont la présence est nécessaire à la vie*, car sous des formes diverses elles interviennent dans tous les processus biochimiques cellulaires.

Les acides aminés sont des molécules où un carbone central se trouve relié à quatre groupements atomiques : un hydrogène, un groupement acide HO—C----O où la liaison C—O est une liaison double, un groupement amine NH₂ , et une chaîne hydrocarbonée

latérale. Il existe vingt acides aminés biologiques différant par leur chaîne latérale.

La polymérisation des acides aminés s'effectue par formation d'eau OH_2 à partir du groupement hydroxyle OH d'un acide aminé et d'un des hydrogènes du groupement amine NH_2 d'un autre acide aminé. Il se forme ainsi un squelette, longue chaîne centrale de groupements peptidiques $\text{O}-\text{C}-\text{NH}-\text{CH}$, ce qui fait donner le nom de polypeptides à ces molécules. A chaque extrémité se trouve soit un groupement amine soit un groupement acide, ce qui fait de la protéine un acide aminé géant.

Une des propriétés les plus importantes des protéines est leur conformation dans l'espace tridimensionnel. On distingue en effet une structure primaire qui est la suite des acides aminés, une structure secondaire qui est la structure spatiale du squelette peptidique et une structure tertiaire qui est la conformation spatiale globale.

La structure tertiaire est le résultat de repliements de la protéine sur elle-même sous l'effet de forces différant de celles en jeu dans les liaisons ordinaires qui déterminent la structure primaire. Bien sûr, cette façon de dire les choses est sujette à caution si l'on tient compte des réserves que la mécanique quantique impose sur la notion de liaison chimique*. On distingue ainsi des liaisons non ordinaires :

liaisons ioniques fortes, impliquant des forces électrostatiques

liaison hydrogène*, liaison faible facile à rompre

interactions hydrophobiques, dans l'interaction avec l'eau environnante

forces de Van der Waals*

Cette structure tertiaire dépend d'une manière essentielle de l'eau qui l'entoure et avec laquelle elle interagit. La structure de l'eau elle-même dépend fortement des liaisons hydrogène entre molécules d'eau. Il s'ensuit que les protéines présentent de très nombreuses conformations voisines et une dynamique complexe, qui favorisent leur activité biologique en leur permettant d'interagir avec de petites molécules. La protéine a en fait une conformation privilégiée, mais on ignore encore comment cette conformation est atteinte lors de la synthèse.

PROTEOMIQUE

PROTON

PSEUDO-ALEATOIRE

Caractère d'un ensemble de nombres présentant des propriétés statistiques et une indépendance analogues à celles des nombres aléatoires mais engendrés par des algorithmes déterministes (relativement simples). Ce sont les suites de nombres qui prennent part au chaos déterministe*. Considérées comme non aléatoires* de par leur mode de production, elles présentent la phénoménologie de l'aléatoire, c.a.d. un vide de forme caractéristique qui entraîne l'emploi du calcul des probabilités*. On peut dire qu'il y a là un caractère aléatoire du non aléatoire. Une conception fort répandue du hasard*, celle du hasard par ignorance, c.a.d. du déterminisme caché, se trouve supplantée là par une notion de hasard essentiel qui n'est pas lié à l'incomplétude de notre connaissance mais à l'impossibilité de mettre cette connaissance en forme. Une connaissance complète n'élimine pas le hasard pseudo-aléatoire. Le discours répandu qui veut caractériser le pseudo-aléatoire par une sensibilité aux conditions initiales dont la mauvaise connaissance expérimentale serait responsable de l'imprévisibilité* du phénomène trouve là ses limites, car cette sensibilité n'est pas la cause du phénomène mais une des conséquences pratiques du vide de forme (non intégrabilité). Une connaissance parfaite des conditions initiales permettrait la prévision* mais la prédiction* demeure interdite par absence de forme mathématique du phénomène.

PSEUDOALEATOIRE (FONCTION)

Dans le cas d'une fonction stationnaire*, c.a.d. une fonction admettant une fonction d'autocorrélation*, on définit comme pseudo-aléatoire une fonction dont la fonction de corrélation tend vers zéro lorsque l'intervalle de temps tend vers l'infini.

Cette perte de mémoire est la cause du caractère pseudoaléatoire de la fonction, en entraînant le défaut de prédiction qui s'y attache.

Les fonctions pseudoaléatoires constituent en quelque sorte une simulation* des fonctions aléatoires stationnaires*. Dans un système dynamique* mélangeant toute trajectoire de phase est une fonction pseudoaléatoire.

La théorie arithmétique des suites équiréparties* modulo 1 permet de construire des classes étendues de fonctions pseudoaléatoires. C'est ainsi que, dans tous les cas connus, l'irrégularité des fonctions pseudoaléatoires a son origine dans l'irrégularité que recèlent les nombres irrationnels.

Une des propriétés mathématique fondamentale des fonctions pseudoaléatoires est le caractère continu de leur spectre*, c.a.d. de la transformation de Fourier* de leur fonction d'autocorrélation temporelle. Cette continuité du spectre signifie en quelque sorte que la fonction n'est pas représentable comme une somme simple discrète de fonctions élémentaires, ce qui est la manifestation profonde de son irrégularité globale.

PSEUDO-SCIENCES

PSYCHANALYSE

Méthode thérapeutique pour résoudre les difficultés mentales et leurs conséquences comportementales par recours aux manifestations d'un univers mental inconscient. Thérapeutique inaugurée par Sigmund Freud* au début du siècle dernier.

A l'instar de la mécanique quantique* c'est une phénoménologie cohérente qui n'a pas accès à ses soubassements microscopiques. Psychanalyse et biologie du cerveau sont des savoirs* distincts.

Quel discours tenir à des psychanalystes désireux de situer leur pratique et leurs concepts au sein des savoirs contemporains et soucieux sans doute de voir la psychanalyse acquérir des fondements scientifiques ? Peut on renouveler le stock d'idées sur lequel la psychanalyse s'est construite il y a un siècle ? Qu'est ce qui peut s'avérer utile dans le foisonnement des nouveautés scientifiques et philosophiques ?

Peut on donner à la psychanalyse un statut scientifique ? Faut il donner à la psychanalyse une mise en forme scientifique ?

S'il s'agit de donner à la psychanalyse le même statut que la physique, soit une doctrine des faits et des causes dont l'idéal est d'éliminer l'ambiguïté, on peut valablement envisager une réponse négative. L'ambiguïté est partie constituante de la psychanalyse.

Il faut éviter à la psychanalyse le même destin historique que l'alchimie* et l'astrologie*. Il y'a là toujours l'ambition de décrypter des formes symboliques qui expriment les profondeurs du psychisme et la tentation néfaste de donner un statut scientifique à ces démarches initiatiques.

On peut dire que la neurobiologie, tout en établissant l'existence d'une activité inconsciente, n'a pas pour le moment établi le siège et la nature de l'inconscient freudien, pas plus que les mécanisme intimes

de la mémoire* et du rêve. Qu'elle est encore loin de pouvoir établir des mécanismes de la pensée et de l'intelligence, et que le problème du rapport du cerveau et de l'esprit reste entier. Ce qui laisse encore de beaux jours à la philosophie si tant est que sa question fondamentale est celle des rapports de la conscience et de la matière, de la pensée à l'être.

Que les énormes acquis de la neurobiologie concernent les mécanismes de la vision et de la transmission de l'influx nerveux, la structure moléculaire des membranes et du récepteur de l'acétylcholine*, la génétique moléculaire du système nerveux. Mais que l'on est loin du compte si l'on veut percevoir la pensée en action, sauf à se contenter des images de l'IRM fonctionnelle* ou à agir sur le psychisme au moyen de neuroleptiques.

Qu'en l'absence de bases biologiques et malgré ses prétensions, la psychanalyse s'inscrit dans le grand courant d'idées qui prit naissance à Vienne en même temps qu'elle, et qui irrigue tout le XX^e siècle. Un courant qui place le langage au premier plan des préoccupations philosophiques. Un siècle langagier et logiciste, dont la révolution technologique informatique marque l'apothéose. Un siècle qui a commencé avec le formalisme et le structuralisme* et s'achève avec les systèmes dynamiques et le naturalisme* cognitiviste*.

Une des composantes de la culture du XX^e siècle est l'implication de la langue dans l'objet même qu'elle veut décrire. Le théorème de Gödel* ou l'échec du positivisme* relèvent de cette impossibilité de séparer l'objet du discours. La littérature fournit des exemples de cette situation culturelle. La psychanalyse est évidemment concernée au premier chef. Non pas que l'inconscient soit structuré comme un langage selon Lacan, mais que le langage structure l'inconscient. La dichotomie cartésienne sujet-objet perd de sa valeur de par l'autoréférence*.

La psychanalyse place au centre de son discours et de sa pratique le problème du sens*. Elle rejoint ainsi les diverses tentatives de donner à la question du sens un statut objectif. Psychanalyse et sémiotique* chassent sur les mêmes territoires. Mais à la suite de l'empirisme logique* et du néo-positivisme*, dont le structuralisme* n'est qu'un fleuron, la sémiotique est restée durant tout le siècle aux mains des linguistes et des logiciens. Il en est de même de la psychanalyse et des sciences humaines dans leur ensemble.

Ce faisant il n'y a pas eu, à quelques exceptions près, de tentatives de donner à la sémiotique des fondements mettant à profit les nouveaux courants de la pensée scientifique de la fin de siècle, dominée par la théorie des systèmes dynamique* et l'étude des

systèmes complexes*. Un paysage intellectuel marqué par les théories de l'autoorganisation* et de la morphogénèse*, accompagnées d'une géométrisation* à tout va de la physique. Depuis Freud la physique a changé.

Qu'après avoir donné à l'inconscient une structure linguistique, Lacan se soit avisé d'utiliser la topologie* comme source d'analogies en psychanalyse, voilà qui est original et reflète l'air du temps.

Les tentatives de R. Thom* et J. Petitot pour constituer à partir des la théorie des catastrophes*, une sémiotique géométrique, une « morphogénèse du sens », reflètent les mouvements de géométrisation* de la physique.

L'universalité des phénomènes d'auto organisation*, de la physique à la biologie, laisse aussi penser qu'il y a là des modèles possibles pour étudier les phénomènes humains comme le langage et la sémiotique. Ainsi par exemple des biosémioticiens* soulignent les aspects dynamiques et d'auto organisation de la sémiotique.

De même le sémioticien danois, P.B. Andersen, défend une conception dynamique de la sémiotique, où les signes émergent, et ne sont pas des entités fixes comme des entrées dans un lexique. C'est ce que pensent aussi les sémioticiens du fameux Groupe μ à Liège, qui considèrent que les signes sont construits par le récepteur.

Le groupe de Luc Steels et Pierre Oudeyer montre que l'apparition des consonnes et des syllabes est un processus d'autoorganisation. Sachant que dans ce domaine toute la difficulté est de produire un modèle explicite d'auto organisation, ce travail est d'un grand mérite. La production de modèles d'autoorganisation est une entreprise difficile comme le montre toute l'histoire récente de l'horlogerie ou de la théorie des instruments de musique.

Dans toutes ces démarches se manifeste la puissance d'un concept nouveau fondamental, celui d'attracteur*. Il y'a là une révolution qui consiste à envisager des systèmes ouverts* où l'existence d'attracteurs est responsable des phénomènes d'autoorganisation.

Que certains attracteurs soient « étranges* » est une anecdote passionnante, mais ne représente pas ce que les attracteurs ont de plus intéressant à nous apprendre.

Le phénomène le plus étonnant est l'existence d'attracteurs de faible dimension pour des systèmes physiques à très grand nombre de degrés de liberté. C'est là le secret de l'autorganisation dans des systèmes si complexes, que l'on pourrait à priori douter qu'ils manifestent quelque propriété d'ordre simple.

La notion d'attracteur de faible dimension est certainement essentielle pour la compréhension des phénomènes cognitifs et la modélisation de l'activité cérébrale. Les attracteurs jouent un rôle central dans le comportement des réseaux neuronaux*. Ainsi peut on faire l'hypothèse qu'une stimulation, visuelle par exemple, place le cerveau dans un état qui évoluerait rapidement vers un attracteur « qui correspondrait à la signification ». La vision d'un peuplier ferait converger l'état de nos neurones vers l'attracteur « arbre ». Cette conception permettrait d'expliquer comment naissent dans notre cerveau les symboles de la psychologie.

La notion d'attracteur montre que les évènements de la pensée peuvent prendre figure dans un espace abstrait différent de l'espace-temps. Un espace fonctionnel. C'est peut-être le sens des différentes topiques freudiennes :

Inconscient	Préconscient	Conscient
Ca	Moi	Surmoi

Que l'on puisse dire du vide* qu'il est l'inconscient* de la matière, ne relève pas d'une analogie, mais sans doute d'une même situation épistémique* de la psychanalyse et de la M.Q. Deux doctrines (théories) consacrées à une classification des faits d'observation. Profondément ancrées dans le positivisme logique*, elles affirment le primat du comportement expérimental, qu'elles expriment par des systèmes formels et langagiers, dont l'efficacité masque mal l'absence de théorie causale sous-jacente.

PSYCHOLOGIE

PSYCHOLOGIE DE LA PERCEPTION

PSYCHOLOGIE EXPERIMENTALE

PSYCHOLOGIE GENERALE

PSYCHOLOGIE GENETIQUE

PSYCHOPHYSIQUE

La psychophysique est une branche de la psychologie expérimentale* qui cherche à déterminer les relations quantitatives qui

existent entre un stimulus physique et la perception qu'on en a. La psychophysique s'intéresse aux sens physiologiques tels que la vue, l'ouïe le toucher (plus rarement l'odorat ou le goût) mais aussi à des sensations comme la perception du temps ou du mouvement.

PUISSANCE (En latin POTENTIA*)

A l'origine, dans la doctrine aristotélicienne, la puissance désigne une modalité* de l'être, exprimant qu'une autre modalité*, l'existence réalisée (l'acte*), est précédée d'une possibilité*d'être. La genèse de l'être est alors considérée comme un passage de la puissance à l'acte. Entre la doctrine de l'acte et de la puissance et celle de la matière* et de la forme*(hylémorphisme) il y'a une relation profonde, puisque la matière serait puissance pure qui ne deviendrait acte que par l'"acquisition" d'une forme.

Introduite pour justifier le mouvement, cette conception restera essentielle dans toutes les démarches ultérieures de la physique, physique moderne et physique contemporaine comprises. On peut même dire que c'est la manipulation du concept de puissance qui fait la force de la Physique. Toute la physique donne un prix au possible, à l'espace de liberté qui entoure tout évènement. De l'énergie potentielle* au champ*, des probabilités* à l'entropie* et l'information*. Sans parler de l'action* sur laquelle reposent toutes les théories fondamentales.

La doctrine aristotélicienne inspire la distinction que René Thom* fait entre la saillance* et la prégnance, qui renvoie plutôt à la distinction entre figure* et fond*.

PYTHAGORISME

QUALIA

QUALITATIVISME

Le qualitatifisme est une démarche de la physique qui privilégie la mise en ordre des qualités* au dépens des relations quantitatives. Proné par Aristote* il a été ressuscité par la dynamique qualitative selon Poincaré* et par la sémiophysique* de René Thom*.

C'est dans le refus critique d'Aristote d'adhérer au programme* platonicien et à l'atomisme* que se trouve la source la plus importante de la formulation d'une approche différente, non mathématique, spécifiquement qualitative : le qualitatifisme. Cette approche non-

réductionniste* consiste en ce que la différence fondamentale entre les corps est dans la différence entre les qualités* et leurs actions et non pas dans les différences entre les figures géométriques et les relations quantitatives. Le modèle de cette démarche apparaît dans la théorie qualitative du lourd et du léger développée dans le livre IV du *Traité du Ciel*. Il y'a un caractère hétérogène des représentations sur les qualités. Une différence fondamentale existe entre la doctrine des qualités comme forces agissantes indépendantes (qualitativisme physico-dynamique) et la doctrine des qualités comme formes.

On peut regretter pour l'avancement de la science qu'Aristote ait négligé presque entièrement l'étude mathématique des phénomènes de la nature, mais ce qu'il se proposait au premier chef, c'était d'en faire la philosophie. Or dans cette perspective, son opposition à la méthode et à l'esprit de l'atomisme était parfaitement justifiée ; à moins d'ériger en dogme le mécanicisme*, la philosophie de la nature ne pourra jamais se limiter à la systématisation mathématique et mécanique des phénomènes.

En ce qui concerne la physique macroscopique des formes, les travaux de Thom appartiennent, on le sait, à ce vaste courant des théories qui ont montré comment une (auto)-organisation* spatio-temporelle pouvait émerger d'interactions physiques élémentaires. Dans ce genre de situations, les phénomènes sous-jacents sont en général des phénomènes coopératifs et collectifs typiquement complexes: phénomènes critiques (de type transitions de phases*), états critiques auto-organisés, chaos* déterministe, etc. Ce n'est pas le lieu ici de revenir sur ces acquis fondamentaux, désormais bien connus, qui ont bouleversé les conceptions classiques de la physique

La physique qualitative et la physique naïve élaborent des analyses *conceptuelles* de la physique qui sont inspirées de l'intelligence artificielle. Pragmatiquement, il s'agit de savoir de quelles connaissances physiques *sommaires mais pragmatiquement efficaces* (i.e. relevant du sens commun) on doit doter une machine (par exemple un robot) pour qu'elle puisse interagir correctement avec son environnement. Pour des raisons évidentes de complexité calculatoire, ces connaissances ne peuvent pas être celles de la physique fondamentale, ou même celles de la physique macroscopique exacte (la mécanique par exemple). Pour arriver à une connaissance pratiquement utilisable, on doit *simplifier* au maximum les équations différentielles de la physique et se focaliser sur les comportements *qualitatifs significatifs* des systèmes (traversées de seuils, points critiques, valeurs critiques des contrôles et bifurcations, etc.). On peut même pousser plus loin la simplification et, comme l'a proposé Patrick

Hayes avec sa physique “naïve”, ramener ces connaissances physiques spontanées à des schèmes conceptuels de base (qui se substituent aux équations et à leurs solutions). On constate alors que ces derniers sont de nature *topologico-dynamique* et ressemblent étonnamment à ceux dégagés autrefois par la phénoménologie et la Gestaltthéorie puis retrouvés par les études de linguistique cognitive: places et positions spatiales (relations d’intériorité, d’extériorité, de positionnement relatif, chemins spatio temporels, bords, frontières, obstacles, etc.), qualités remplissant des domaines spatiaux, processus temporels, événements d’interaction entre actants spatio-temporels, mouvements, forces, etc.

Barry Smith a insisté sur le caractère *néo-aristotélicien* de ces points de vue approchant la physique en termes de structures conceptuelles et de représentation des connaissances. Contrairement à la plupart des spécialistes, qui défendent une conception soit pragmatique-instrumentaliste (la physique naïve est utile à un niveau descriptif et inférentiel mais ne possède aucun contenu objectif propre) soit psychologique-cognitive (la physique naïve relève d’une théorie des “modèles mentaux” constitutifs du sens commun), il défend quant à lui une conception *ontologique*. Selon lui, la physique naïve relève d’une *ontologie qualitative* (aristotélicienne) du monde réel.

QUALITE

Caractéristique ou attribut* ou propriété* ou disposition* d’un corps ou d’un concept. On parle de qualités physiques, de qualités biologiques, de qualités logiques (vrai ou faux), de qualités esthétiques. Jusqu’au XVII^{ème} siècle on entendait par qualités occultes (Cf Occultisme*) des vertus inconnues, propres à chaque substance, que l’on baptisait d’un nom scientifique ; on croyait tout expliquer en alléguant des qualités occultes, ainsi l’action de l’opium était attribuée à une vertu dormitive. Ces qualités occultes étaient des dispositions*.

Aristote* admettait quatre qualités premières par lesquelles on expliquait tout : *le chaud, le froid, le sec et l’humide* ; chacun des quatre éléments était caractérisé par une de ces qualités, le feu par le chaud, l’air par le froid, la terre par le sec, et l’eau par l’humidité. On fit concorder avec ces éléments les quatre saisons, on admit pour le même motif quatre humeurs : la bile, la pituite, le sang, l’atrabile ; quatre complexions : la bilieuse, la flegmatique, la sanguine, la mélancolique.

Au XVII^{ème} siècle Boyle* et Locke* ont introduit une distinction essentielle entre qualité première* et qualité secondaire*.

Cette distinction était profondément liée aux conceptions atomistiques et mécanistes de l'époque et se trouvait présente chez Galilée*, Descartes* et Gassendi*. Cette distinction entre objectivité* et subjectivité* n'a pas été acceptée comme telle par les grands positions philosophiques ultérieures, Hume* et Kant*, empiriocriticisme*, néopositivisme* ou matérialisme dialectique*.

QUALITE ET QUANTITE

On énonce souvent une loi de la transformation de la quantité en qualité* comme loi générale d'évolution de la nature, du monde matériel, des sociétés humaines et de la pensée. C'est une loi d'apparition de nouvelles qualités par accumulation de variations quantitatives. C'est une loi d'émergence* proclamée par le matérialisme dialectique*.

On peut en multiplier les exemples. Une variation quantitative de la température fait passer un corps chimique par différents états (phases thermodynamiques) du solide au liquide puis au gazeux. Les variations d'un paramètre physique d'un système peuvent aboutir à des bifurcations* où le système change de régime. Concept de la théorie des systèmes dynamiques* où des petites variations des paramètres engendrent des changements qualitatifs du mouvement, des variations de la structure topologique de l'espace de phase* (exemple, l'apparition d'un cycle limite*).

Dans la thermodynamique de non équilibre* développée par l'école de Prigogine* les bifurcations jouent un rôle déterminant dans l'apparition des structures dissipatives*.

La théorie des catastrophes* est une théorie générale de l'apparition de formes par variation de paramètres.

L'addition d'un proton au noyau d'un atome et d'un électron dans la périphérie fait passer d'un élément de la classification périodique des éléments de Mendeleev* à un autre.

Tous ces exemples confortent la notion de qualité physique ou biologique.

QUALITE PREMIERE

Caractéristique appartenant en propre à un objet. Qualité objective*. Terme historique correspondant à la notion d'attribut*.

QUALITE SECONDAIRE

Caractéristique d'un objet révélée par l'interaction avec un autre objet, en particulier avec un observateur*. Qualité subjective*. Terme historique correspondant à la notion stricte de propriété*.

La révolution scientifique du XVII^{ème} siècle a fondé la mathématisation du monde sur la distinction des qualités primaires et des qualités secondaires. Pour la tradition aristotélicienne comme pour le sens commun les choses sont en elles mêmes à peu près comme nous les percevons : l'herbe est verte, le ciel est bleu, les plumes sont légères et le plomb est lourd. Les qualités sont dans les choses. Pour les tenants de la nouvelle physique, les qualités sensibles ne sont pas dans les choses, elles ne sont que les réactions de notre organisme ou de nos instruments à leur « réalité objective » faites de qualités primaires comme l'étendue* ou le mouvement*. Ainsi pour Descartes* le sujet connaissant échappe au discours de la science parce qu'il ne relève plus de l'étendue mais d'un ordre radicalement distinct l'ordre de la pensée. La mécanique quantique portera cette distinction à son paroxysme en s'avérant un discours largement limité aux qualités secondaires, en intégrant le sujet connaissant à travers la notion d'observable*.

QUANTIFICATEUR (en logique mathématique)

QUANTIFICATION

La description quantique de tout système microphysique commence par la définition d'un modèle classique en termes de particules, de forces et de champs, obéissants aux lois de la mécanique classique et de l'électromagnétisme. La quantification consiste à remplacer symboliquement, selon une procédure mathématique, les différents termes de ce modèle par des objets mathématiques convenables. Quantifier, c'est produire un modèle quantique* symboliquement associé à un modèle classique. Le processus inverse de retour du modèle quantique au modèle classique dans des conditions physiques déterminées, constitue le problème de la limite classique* de la mécanique quantique.

Techniquement la quantification consiste à donner une règle de correspondance entre toute fonction classique de la position et du moment et un opérateur*, de façon à ce qu'il y ait correspondance entre les crochets de Poisson* et les relations de commutation* entre

opérateurs*. On peut qualifier cette procédure de mise en place d'une analogie structurale entre la mécanique classique et la mécanique quantique. Ceci n'est pas satisfaisant, car la mécanique quantique se distingue drastiquement de la mécanique classique, même si elle admet une limite classique. C'est pour répondre à cette critique qu'il semble préférable de définir les opérateurs* correspondant aux observables* qui sont définies dans l'espace temps macroscopique à partir des propriétés de symétrie de l'espace temps. D'un point de vue mathématique la quantification consiste en la représentation de l'algèbre des observables* par des opérateurs* sur un espace de Hilbert*.

En son sens originel le mot quantification désigne souvent le caractère discret des valeurs possibles des observables des systèmes microphysiques. Effectivement en mécanique quantique les seules valeurs possibles d'une observable sont les valeurs propres* de l'opérateur* qui la représente. On dit que ces systèmes sont quantifiés. Il y apparaît des nombres quantiques* et des quanta*, et la constante de Planck* y joue un rôle central.

Le mot quantification désigne donc à la fois un état de fait expérimental et une procédure théorique qui vise à reproduire cet état de fait.

Il n'y a pas de quantification du temps*, qui garde en mécanique quantique sa représentation classique

QUANTIFICATION DU CHAMP (Cf. CHAMP QUANTIQUE*)

QUANTIFICATION DE L'ESPACE TEMPS

Désignation d'une théorie généralisée des particules élémentaires* admettant comme hypothèse l'existence d'une longueur fondamentale* au sein des constantes universelles*. Le but immédiat d'une telle généralisation est l'obtention d'une théorie où toutes les grandeurs physiques seraient par nature finies.

La plupart des théories de la physique, mécanique quantique comprise, sont fondées sur une conception de l'espace temps découlant essentiellement de considérations sur de objets macroscopiques, pour de grandes longueurs et de grands intervalles de temps. Mais de nombreuses difficultés de la théorie des particules élémentaires, en particulier le problème des divergences*, peut laisser penser que la conception de l'espace temps doit être modifiée aux très courtes distances et aux très courts intervalles de temps qui interviennent en microphysique.

L'introduction d'une nouvelles constante universelle sous forme de longueur fondamentale*, correspond à une hypothèse considérant que les particules élémentaires ne sont pas ponctuelles, et que leur étendue s'introduit comme une échelle minimale de longueur.

La quantification de l'espace temps n'est pas une théorie quantique mais une discrétisation de l'espace temps.

La théorie des cordes* s'inscrit dans une telle stratégie.

QUANTIFICATION (SECONDE)

La mécanique quantique ne donne pas la possibilité de décrire les variations du nombre des particules dans un système de particules identiques indiscernables. La seconde quantification est une méthode de quantification*d'un système à nombre variables de particules. Sa caractéristique essentielle est l'introduction d'opérateurs* correspondant à la création* et l'annihilation* des particules. Son observable de base est le nombre de corpuscules. Il est particulièrement adapté à la considération des particules comme quanta* d'un champ. L'état de vide* est celui où il y a zéro quanta, il peut être obtenu par application d'opérateurs d'annihilation, et à partir de lui par l'application d'opérateurs de création on peut obtenir tous les autres états à nombre défini de quanta.

La seconde quantification ne décrit pas des processus physiques de création et d'annihilation de particules mais se borne à établir une comptabilité formelle de ceux ci.

Le nombre de particules qui se trouvent dans les états est appelé nombre d'occupation de ces états. La donnée d'un vecteur d'état sous une forme où l'on fixe les nombres d'occupation de tous les états possibles du système est dite représentation par nombres d'occupation.

QUANTIQUE

Adjectif utilisé pour qualifier les systèmes physiques, les propriétés physiques et les théories physiques où se manifestent des phénomènes discrets caractéristiques, signalés par l'intervention d'une constante universelle: la constante de Planck*. La constante de Planck peut être considérée comme un quantum* élémentaire d'action*.

Mécanique quantique*, objet quantique*, vide quantique*, nombre quantique*, transition quantique, niveau quantique, interférence quantique, électrodynamique quantique*, théorie

quantique des champs*, optique quantique*, électronique quantique, générateur quantique, statistique quantique, liquide quantique, probabilité quantique, logique quantique, chimie quantique*, biochimie quantique, biologie quantique, cybernétique quantique, calculateur quantique, cryptographie quantique, métrologie quantique, puits quantique, tomographie quantique, gravitation quantique, cosmologie quantique....cuisine quantique.

Tout ce qui relève de la théorie quantique est quantique, y compris les éléphants et la naissance de l'univers, si on veut adopter ce point de vue.

Le mot "quantique" remplace progressivement le mot "atomique" pour bien signifier que les atomes et les particules microphysiques ne sont pas de simples petites billes, mais des objets quantiques*.

A cette conception du quantique comme qualification spécifique de la structure de la matière microscopique se substitue aujourd'hui une définition plus large qui englobe des phénomènes microscopiques et macroscopiques* (Cf. Effet quantiques macroscopiques*, corrélations quantiques*). Le quantique qualifierait l'existence de corrélations* statistiques entre phénomènes observés non reproductibles par un modèle statistique classique. Ces corrélations spécifiques qui peuvent se produire à grande distance nécessitent pour leur description l'emploi du formalisme quantique où le système est caractérisé par la notion d'état* quantique. Le quantique est donc ce qui relève d'un calcul de probabilité* spécifique fondé sur l'emploi de la fonction d'onde* (amplitude de probabilité). Ce que d'aucuns appellent un calcul ondulatoire de probabilités.

QUANTITE DE MOUVEMENT (Cf. Impulsion*)

QUANTON

Terme proposé pour désigner une particule élémentaire en insistant sur le fait qu'il s'agit d'une particule quantique (objet quantique*) et non pas d'un objet localisé classique. Ceci lève l'ambiguïté présente lorsque l'on considère l'électron comme une particule, et permet d'éviter de nommer particule le photon* ce qui crée une image malencontreuse. Malheureusement ce terme n'a pas eu

la reconnaissance qu'il mérite. Il fait peut être double emploi avec le mot quantum*.

QUANTUM (au pluriel QUANTA)

Le concept de quantum est le concept central de la Théorie Quantique, au point que celle ci se dénommait au départ Théorie des Quanta. En anglais on dit toujours Quantum Theory. Grain d'énergie dans les échanges entre la matière et la lumière, le concept de quantum s'est enrichi au fil du développement de la conception du dualisme* onde-corpuscule, qu'il a lui même contribué à fonder.

Malgré les réticences de Planck*, l'inventeur des quanta d'énergie, Einstein* fit évoluer ce concept en le considérant comme un quantum de lumière. Démarche décisive où le quantum apparaît comme une caractéristique quantique du champ. C'est le héros central de la Théorie Quantique des Champs*.

En fait entre Planck et Einstein s'instaure le double jeu où s'enfermera la mécanique quantique: d'un côté l'observable* macroscopique-le grain d'énergie localement détectable par interaction avec la matière (la photodétection*) - de l'autre l'état* du système enfermé dans une boîte noire*, mais qui n'est en rien une description de ce système, sauf à vouloir exhiber des propriétés curieuses ou paradoxales. Ainsi d'un quantum qui caractérise l'excitation du champ, mais qui n'est localisé nulle part et participe d'une "caractérisation" globale du champ. Lui donner un statut de "particule" à cause de son caractère discret, masque mal sa nature profonde d'objet quantique, englué dans le dualisme onde-corpuscule*. Le caractère de particule du quantum est d'une certaine façon purement métaphorique*. Paradoxalement le quantum-particule se rapporte à des aspects non-locaux du champ alors que la description locale passe par l'utilisation des valeurs du champ en tout point de l'espace-temps.

On ne détecte pas un quantum, mais on peut observer des signaux discrets dont le comptage correspond au nombre de quanta présents dans l'état observé. Ce nombre de quanta est une observable* non-compatible avec l'observable intensité du champ, car on conçoit bien que l'on ne peut observer le local et le non local dans une même expérience.

Le photon* est un quantum du champ électromagnétique.

L'absence de quanta pour un champ signifie simplement que le champ n'est pas globalement excité; il est dans son état de plus basse énergie et continue d'exister localement. A zero quanta correspond l'état de vide du champ. Le Vide Quantique.

Caractéristique non-locale du champ le quantum y joue le rôle fondamental de transporteur d'interaction" par le champ entre les "sources" du champ. En théorie quantique des champs* l'interaction apparaît comme "émission" et "absorption" de quanta virtuels* du champ.

Ainsi la notion de quantum apparait comme essentielle pour tout champ quantifié et les quanta reçoivent en général des noms :

Le photon* est le quantum du champ électromagnétique.

Le gluon* est le quantum du champ vectoriel de gluon en chromodynamique quantique* où il assure l'interaction forte*.

Le graviton est le quantum hypothétique du champ de gravitation.

Le phonon est le quantum du champ de vibration des atomes dans un cristal.

Le quantum est un témoin de l'activité métaphorique incessante de la physique quantique.

QUARKS

Particules tout d'abord hypothétiques constitutives de tous les hadrons*. Ce sont des fermions*. Il y'a six sortes de quarks distingués par leur saveur* : d, u, s, c, b, t. Down, up, strange, charm, bottom, top.

Un proton* consiste en deux quarks u et un quark d. Un neutron* consiste en un quark u et deux quarks d.

La théorie des quarks a été élaborée par Gell'man en 1964 (l'année du champ de Higgs*). Ce nom est tiré du roman de James Joyce « Finnegan Wakes », où il désigne quelque chose d'indéterminé, de mystique.

Les quarks possèdent également un nombre quantique que l'on a nommé charge de couleur*. Un quark peut être « rouge », « vert » ou « bleu », mais il peut changer de couleur en échangeant un gluon

À chaque quark correspond une antiparticule, nommée anti-quark, de même masse, mais de charge électrique opposée et de charge de couleur complémentaire, appelée anti-couleur : un anti-quark peut ainsi être « anti-rouge », « anti-vert » ou « anti-bleu ».

La couleur ici est une analogie qui rend compte du fait que l'on n'observe jamais de quark seul. À cause du phénomène de confinement des quarks, on ne peut observer que des particules « blanches », c'est-à-dire formée par exemple de trois quarks de couleurs différentes : un rouge, un bleu et un vert (ce qui donne un

baryon) — qui en synthèse additive des couleurs donnent une lumière blanche — , ou de deux quarks de couleurs complémentaires, comme rouge et anti-rouge (ce qui donne un méson).

La charge « de couleur » est la source de l'interaction nucléaire forte : l'interaction nucléaire entre les nucléons et plus généralement entre les hadrons est dérivée de l'interaction « de couleur ». Comme l'interaction entre atomes et entre molécules est elle-même dérivée de l'interaction électromagnétique entre protons et électrons.

ce », source de rayonnement quasistellaire. Sources puissantes de rayonnement électromagnétique (ondes visibles et radio) situées en dehors de notre galaxie et se présentant comme une étoile au télescope optique. Les quasars visibles de la Terre montrent tous un décalage vers le rouge très élevé. Selon la loi de Hubble ceci signifie que les quasars sont très éloignés. Ils se trouvent en effet à des milliards d'années lumière. On recense plus de 100.000 quasars. Les quasars sont les objets les plus brillants connus dans l'Univers.

QUASI-ALEATOIRE

Caractère d'un ensemble de nombre présentant des propriétés de répartition statistique suffisantes pour leur emploi dans la méthode de Monte-Carlo*, mais ne possédant pas entre eux de propriétés d'indépendance caractéristiques des nombres aléatoires* ou pseudo-aléatoires*. Ce sont fréquemment des nombres appartenant à une suite équilibrée*.

QUASI-CRISTAL

QUASI-PARTICULE

Excitation élémentaire d'un milieu condensé (corps solide, liquide) se comportant d'une certaine manière comme une particule quantique. Ces excitations sont en règle générale l'expression du mouvement collectif d'un grand nombre de particules. L'interaction entre particules d'un système fait qu'une excitation ne peut rester localisée sur une particule et se propage aux particules voisines sous forme d'une onde d'excitation. Dans l'esprit du dualisme onde-corpuscule*, c'est à cette onde que l'on associe une particule, la quasi-particule.

La notion de quasi particule diffère de celle de particule virtuelle en ce qu'elle n'est pas une particule tout à fait fictive mais un phénomène physique ayant l'apparence d'une particule, une particule

symbolique censée remplacer un grand ensemble de particules en interaction pour rendre compte de son comportement. Ainsi dans la méthode d'approximation pour un système de N particules, dite méthode du champ self consistant*, un ensemble de particules en interaction est remplacé par un ensemble de quasi-particules analogues aux particules initiales mais se comportant comme des particules individuelles dans le champ de toutes les particules.

La quasi particule se comporte ainsi comme un quantum* d'un champ exprimant un comportement collectif, en particulier des vibrations collectives correspondant aux degrés de liberté du système. Le phonon* est le quantum des vibrations élastiques d'un milieu, le plasmon* le quantum des vibrations de densité- de charge, l'exciton* le quantum des vibration moléculaires dans un cristal moléculaire*.

QUASI_PERIODIQUE

QUIDDITE

Mot de la scolastique* latine pour désigner la nature de ce qui est. L'essence* des choses.

Au XIV ème siècle le savant érudit juif espagnol Hasdai Crescas* se livre à une discussion sur l'essence* et l'existence* de Dieu. *Dieu n'est ni un corps ni une faculté inhérente à un corps. La quiddité de Dieu est absolument insaisissable, au point que même l'intuition directe de ses attributs essentiels fut refusée au prince des prophètes (Maimonide*)*. Mais son existence est en revanche franchement dévoilée. Si de l'essence il est impossible d'exprimer quoi que ce soit, sinon uniquement qu'elle est, tandis que la patence de l'existence est indiquée par les mots « Je serai ce que je serai ». On est en pleine discussion sur l'interprétation de la mécanique quantique* !. La nature et le comportement.

QUINTESENCE

Du latin, quinta essentia - cinquième essence. Dans la philosophie antique, le "cinquième élément" ou "éther" (substance des astres) dont les corpuscules prennent selon Platon la forme d'un dodécaèdre régulier. Selon Aristote, la quintessence ou l'éther est la substance du monde supra lunaire, qui à la différence des quatre éléments du monde sublunaire n'est pas soumis à la génération et à la dégradation. C'est cette substance du Ciel que les Alchimistes* vont

vouloir utiliser sur la Terre, comme médiateur* universel entre les éléments

RADIOACTIVITE

Transformation spontanée d'isotopes instables d'éléments chimiques en d'autres isotopes généralement d'éléments différents. Cette transformation s'accompagne de l'émission de particules élémentaires, de noyaux atomiques comme les noyaux d'hélium (particules α) et de rayonnement électromagnétique de haute fréquence. On distingue la radioactivité naturelle des isotopes existant dans la nature de la radioactivité artificielle des isotopes produits lors des réactions nucléaires*.

RADIOASTRONOMIE

Domaine de l'astronomie étudiant les émissions radiofréquence* des corps célestes au moyen de radiotélescopes*. C'est une science relativement jeune qui a fait ses débuts dans les années 1930. Elle a permis la découverte du rayonnement fossile*.

RADIOELECTRICITE (Cf. Radiophysique*)

RADIOFREQUENCE

Fréquence d'ondes électromagnétiques (dites micro-ondes) dont la longueur d'onde est supérieure à 0,1 mm. C'est la fréquence des ondes radio étudiées en radiophysique*. Si le XIX^{ème} siècle a été le siècle du spectre* visible et des rayonnements ultra-violets, le XX^{ème} aura été celui des micro-ondes et celui des rayons X.

RADIOPHYSIQUE

Le XX^e siècle est le siècle de le radio. Le siècle où l'engendrement, la propagation, la réception et les interactions avec la matière, des ondes électromagnétiques de grande longueur d'onde (au-delà de l'infra-rouge-microondes) a conduit à une extraordinaire explosion des moyens de communication, du radar au téléphone portable, de la radioastronomie* à la communication à très longue distance en cosmonautique*. La radiophysique est l'étude des phénomènes liés à ces microondes, une optique* des microondes. Tout comme pour l'optique on y distingue une radiophysique classique et une radiophysique quantique*.

La radiophysique classique s'est développée dans les années 20-30 du siècle dernier sous le nom de radioélectricité, en unissant des problèmes de radiotechnique et d'électronique*. Elle a eu le mérite de constituer la première physique non-linéaire* et d'ouvrir la voie au développement de la théorie des systèmes dynamiques. Le mérite en revient à des radioélectriciens comme Van der Pol et l'école de Gorki (Andronov*) qui étudièrent les systèmes vibratoires, les auto-oscillateurs* et l'amplification des vibrations électriques. Elle a aussi stimulé le développement de l'étude des processus aléatoires*, par l'étude de l'influence des fluctuations* pour les vibrations électriques dans des dispositifs concrets et les méthodes d'extraction du signal*, porteur d'information*, d'un ensemble de signaux utiles et de bruits*. C'est la radiophysique statistique*, théorie mathématique du signal, liée à la théorie mathématique des vibrations, à la théorie du contrôle automatique*, à la théorie de l'information* et à la cybernétique*.

En s'intéressant à l'interaction des vibrations électriques et des ondes radioélectriques avec les porteurs de charge électrique dans le vide, les gaz et les solides, la radiophysique est à l'origine du développement des lampes et des tubes électroniques, ancêtres des amplificateurs à semi-conducteurs*, et donc à l'origine de la constitution de l'électronique* moderne.

La radiophysique s'intéresse aussi à la propagation des ondes électromagnétique dans différents milieux servant à la communication. Elle est d'une aide précieuse dans la géophysique.

La radiophysique quantique ouvre une ère nouvelle de l'optique* et de l'électronique*, marquée en particulier par la mise au point du maser*, prédécesseur du laser*.

RADIOPHYSIQUE QUANTIQUE

RADIOSPECTROSCOPIE

Spectroscopie dans le domaine des micro-ondes (radiofréquence*). Si la spectroscopie dans ultra-violet et le visible concerne les états d'énergie des électrons atomiques et moléculaires, si la spectroscopie dans l'infra-rouge concerne les vibrations moléculaires, la radiospectroscopie concerne la rotation des molécules. Dans le four à micro-ondes, c'est la rotation des molécules d'eau qui en détruisant des liaisons hydrogène* entre protéines assure la cuisson. Aucune chaleur n'est mise en jeu.

RADIOTELESCOPE

RAIES (SPECTRALES)

RAISON (du latin ratio)

La raison désigne soit l'intelligence en général soit, l'usage de nos facultés intellectuelles pour le discernement du vrai et du faux et l'organisation de notre perception du monde. C'est la capacité de l'homme grâce à son cerveau et à travers l'outil que constitue le langage de donner des situations vécues une description et une interprétation explicites. C'est l'ensemble des manifestations cognitives qui concourent à la connaissance active du monde. Connaissance, compréhension, décision, action. « Human understanding » pour garder la terminologie de Locke*, reprise plus récemment par Toulmin*. Un instrument pour explorer le monde, une norme pour juger les pensées et les actions. On oppose souvent la raison à la connaissance empirique.

La raison s'exprime par une construction verbale qui devient autonome et transmissible, tout comme un outil ou une machine. Les instruments de la raison qui sont souvent produits par la science*. Ce caractère productif de la raison crée une parenté certaine entre la nature de ses objets et celle de ceux qu'enfante à la même époque l'activité scientifique, artisanale et industrielle. Il y a un rapport certain entre méthodes de la connaissance et contenu des connaissances. Ce n'est pas par hasard si une certaine idée de la raison s'est cristallisée au XVIII^{ème} siècle à l'époque où la Révolution Industrielle affirme avec éclat les facultés opératoires de l'espèce humaine. Conscience simultanée et corrélative du pouvoir d'expression et du cadre où cette expression s'exerce. Prise de pouvoir technique accompagnée d'une prise de pouvoir conceptuel, comme si l'euphorie de l'action créait les conditions d'une exacerbation de l'activité de l'esprit.

On a beaucoup discuté sur la nature et les caractères de la raison, sur ses rapports avec les autres facultés. Il y a ceux qui pensent que la raison est une faculté spéciale, comme Platon*, Leibniz* ou Kant* (*Critique de la raison pure*) et ceux qui lui refusent une existence à part et qui l'expliquent comme l'expérience aidée de l'abstraction, de la généralisation et du langage, comme Locke* ou Condillac*. Le rationalisme* opposé à l'empirisme*.

Comme l'activité de la raison est souvent tournée vers la définition des causes, le mot raison s'entend aussi comme cause*. C'est en ce sens que Leibniz* l'emploie dans son *Principe de raison suffisante* en vertu duquel aucun fait ne peut avoir lieu sans qu'il y ait une raison suffisante pour qu'il soit de telle manière plutôt que de telle autre.

Il y a une histoire de la raison au gré des connaissances et des cultures.

Dans une première phase de l'évolution de la pensée la raison était essentiellement analytique. On cherchait à identifier les acteurs et les facteurs des phénomènes. Dieu*, l'homme, l'esprit, la matière*, l'espace*, le temps*, les forces*, l'énergie*, les mots, les concepts*, les formes*, les lois*. Un inventaire systématique de l'univers. Donner la raison d'un événement c'était (et c'est toujours) nommer l'acteur responsable. Une raison atomique et corpusculaire, servie par l'Atomisme* et le Mécanisme*.

Paradoxalement c'est lorsque l'Atomisme triomphe ouvrant la porte à des domaines de complexité insoupçonnés que se met en place une nouvelle raison, une raison fonctionnelle qui s'intéresse plus à la pièce qu'aux acteurs. A la mise en évidence et au recensement des forces et des facteurs d'évolution succède maintenant un intérêt pour l'évolution elle-même.

La raison analytique et corpusculaire était une raison rigide et normative. Des idées fixes, des procédures stéréotypées, des concepts immuables. Une raison autoritaire selon un programme préétabli qui donne une réponse à toutes les situations. D'où bien des abus et une mauvaise réputation. Au nom de la raison que de déraisons.

La raison fonctionnelle et dynamique est une raison mobile et adaptative. Une faculté à changer de point de vue, d'idées, de procédures et de concepts. Une raison régulatrice adaptative doit faire face à des situations imprévisibles ou difficiles à prévoir de par leur complexité.

L'irrationnel* était ce qui ne rentrait pas dans le catalogue des acteurs homologués. L'irrationnel devient ce qui n'évolue pas et ne s'adapte pas.

L'apparition de cette nouvelle raison se fait d'abord sentir dans les théories physiques obligées d'introduire à leur corps défendant des principes limitatifs fondamentaux.

La thermodynamique avec le second et le troisième principe, la relativité avec la vitesse constante et finie de la lumière, la mécanique quantique avec ses limitations de toutes sortes –inégalités de Heisenberg*, principe de Pauli*, absence de clonage*, corrélations avec absence de signal dans l'enchevêtrement*. Manifestations d'une

raison limitative, énonçant les bornes que l'on ne peut outrepasser. A l'intérieur de ces bornes la raison structurante trouve alors le champ libre pour son action, exploitée par l'axiomatique quantique*. Une raison structurante fortement conditionnée par une raison limitative.

Le véritable essor de la nouvelle raison ne s'effectue en fait qu'à partir des années 1930 lorsque les travaux discrets des logiciens déplacent les problèmes de la logique de celui de la vérité* à celui de la calculabilité*. Travaux qui vont par ailleurs influencer le développement des calculateurs électroniques. C'est seulement dans les années 60 que les implications théoriques et pratiques des notions d'algorithme* et de calculabilité débouchent sur une élaboration du problème de la complexité*. La notion de complexité s'élabore à la fois à l'intérieur de la logique* et de la théorie des systèmes dynamiques*. La nouvelle raison est une doctrine de la complexité appuyée sur un néo-mécanisme*. Un effort pour élaborer une conception cohérente de la modélisation* de l'expérience, nécessairement incertaine, risquée, précaire.

RAISONNEMENT (du latin ratiocinatio)

Opération de l'esprit qui consiste à démontrer une proposition qui n'est pas évidente par elle-même à l'aide d'autres propositions reconnues vraies. C'est le raisonnement par déduction* qui va du général au particulier, d'une loi de la nature ou d'un axiome mathématique à une de leurs applications. Dans le raisonnement par induction* on va du particulier au général.

La logique* énonce les mécanismes et les règles du raisonnement.

RAISONNEMENT PAR ANALOGIE

RAISONNEMENT PAR L'ABSURDE

RAISONNEMENT PAR RECURRENCE

RAISON SUFFISANTE (PRINCIPE DE)

RATIONALISME

Le rationalisme est une position philosophique opposée en un sens à l'empirisme*, privilégiant la raison* comme source de connaissance. Il suppose l'emploi de règles logiques* et de concepts* à

priori. Le rationalisme est un des piliers de l'activité scientifique. Il s'oppose à l'irrationalisme* qui se réfugie dans l'inexplicable, exprimé par le mysticisme, la magie, l'occultisme, le paranormal ou la superstition.

Historiquement on définit un rationalisme continental en le distinguant de l'empirisme* anglais (Locke*, Berkeley* et Hume*), pour dénommer les positions de Descartes*, Leibniz* et Spinoza*, qui pensaient que l'on peut acquérir par la raison des connaissances supérieures à celles fournies par les sens. Le rationalisme de Kant* peut être considéré comme un rationalisme critique. Le renouveau de la logique* à la fin du XIX^e siècle inaugure un rationalisme mathématique qui va en se prolongeant aujourd'hui à travers l'informatique*.

Le XX^e siècle a connu deux grands mouvements philosophiques qui se sont voulus des entreprises rationalistes : l'empirisme logique*, où la connaissance provient de l'analyse logique du langage, et la phénoménologie transcendantale* qui entend procéder par introspection pour dégager les structures fondamentales de la conscience pure.

Si le rationalisme radical semble perdre de l'influence sous l'effet des attitudes de déconstruction*, il se manifeste encore dans les conceptions linguistiques de Chomsky* qui veulent que l'esprit soit doté au départ de catégories préformées qui déterminent la structure du langage et l'appréhension du monde.

RATIONALITE

Dans l'Antiquité la rationalité s'accomplit dans la logique* du discours. La logique aristotélicienne* en est le modèle type. Elle dominera la pensée, y compris dans l'époque médiévale.

La révolution galiléenne* introduit une nouvelle rationalité en affirmant l'idéal d'une mathématisation de la Nature. Les mathématiques*, dont la géométrie*, créent une image idéale du monde qui s'impose comme la seule image acceptable. A la logique du discours succède une logique du monde. Une rationalité physicienne où tout peut être déduit apodictiquement*. Une rationalité qui permettra à Spinoza* de présenter Dieu « *more geometrico* ».

Dans « *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale* » Husserl* a minutieusement décrit la naissance de cette nouvelle rationalité. Le rôle de modèle tenu par la méthode de la science de la nature, ou, en d'autres termes, par la rationalité physique. Il n'est pas étonnant que nous trouvions déjà chez

Descartes* l'idée d'une mathématique universelle. Le monde doit être en soi, un monde rationnel, dans le nouveau sens de la rationalité, et physique, emprunté à la mathématique et à la nature mathématisée, et corrélativement la philosophie, la science universelle du monde, doit être édifiée, en tant que théorie rationnelle unifiée, *more geometrico*.

Cette rationalité va s'exprimer dans la musique, et J.S. Bach* en marquera l'apogée. Introduire un ordre rigoureux en musique avait toujours été l'intention des savants de tous les temps. Il est donc naturel que ces idées soient reprises au XVII^e siècle, qui se trouve par ailleurs tout imprégné de néo-platonisme* ou de néo-pythagorisme. En 1633, Marin Mersenne* publie son *Harmonie Universelle*, Descartes*, à son tour fait paraître un *Abrégé de Musique*, Gassendi* compose une *Initiation à la Théorie de la Musique*. A la recherche de la perfection, Bach, particulièrement dans les dix dernières années de sa vie, s'est tourné de plus en plus vers des expériences spéculatives, héritées de cette tradition rhétorique* et scientifiques, encore très vivaces à l'Age des Lumières* où le fondement de la musique reste le nombre. A la montée en puissance des sciences de la vie va correspondre la nouvelle musique romantique.

Kant qui tente de dépasser l'opposition entre rationalisme* et empirisme*, tient à distinguer la mathématique et la physique, le domaine des essences* ou des possibles* et le domaine de la nature et de l'existence*. On ne peut attribuer aux figures géométriques (puisque dans leur concept rien n'est pensé qui exprimerait une existence), qu'une essence, mais non une appartenance à la nature. Ainsi il y a d'un côté l'essence et le possible, et de l'autre l'existence et le réel. Pour Kant, strictement parlant, les deux ordres du réel et du possible sont incommensurables. Quoique contienne notre concept d'un objet, nous sommes toujours obligé d'en sortir pour lui attribuer une existence.

Dans l'univers leibnizien, le principe de continuité servait à établir des liaisons et des passages à la limite entre les vérités de raison et les vérités de fait, et le principe du meilleur permettait, à l'intérieur du monde des essences et des possibles, de choisir quelles essences et quels possibles devaient passer à l'existence.

Mais Descartes* avait déjà scié la branche sur laquelle il était assis. C'est lui le fondateur moderne du rationalisme objectif, de la rationalité mathématique et physique, d'une philosophie se voulant une mathématique universelle, qui fait éclater l'édifice en instaurant un dualisme* de la matière* et de l'esprit. Si le modèle de la rationalité cartésienne reste présent dans les consciences jusqu'à nos jours et se trouve aux fondements de nombreuses sciences, sinon de la Science, il

va subir de nombreux aménagements. En fait chaque science nouvelle comporte en elle un type spécifique de rationalité. Il ya une rationalité biologique, il y a une rationalité des sciences humaines, il y a une rationalité de la physique quantique*, il y a une rationalité du néomécanisme*. Quant à la psychologie* elle n'est vraiment pas prête d'acquérir une rationalité de type physico mathématique, car malgré de nombreux modèles mathématiques, elle résiste à toute espèce de formalisation*.

Aujourd'hui la rationalité n'est plus raisonnable, et c'est d'être parvenue à échapper au sens commun que la science tire sa force.

RATON LAVEUR

Le raton laveur est un animal familier qui joue un rôle constant dans ce lexique. Sa présence est là pour rappeler au lecteur que le ton même du lexique est empreint de familiarité et veut avec humour dispenser un scepticisme, une distanciation et une subversion face aux constructions "sérieuses" de la Science. D'un savoir conquérant à une science perplexe.

Le raton laveur est l'objet "faitiche*" d'un postmodernisme* conscient avec ironie de ses prétentions excessives, l'animal surprise qui affirme la possibilité de déconstruction* dont tout discours est menacé. Jacques Prévert merci.

RAYONNEMENT

RAYONNEMENT DE CERENKOV

RAYONNEMENT DU CORPS NOIR

RAYONNEMENT RESIDUEL (Fond diffus cosmologique. Rayonnement fossile)

Rayonnement électromagnétique émis à la suite du Big Bang* . Par suite de son interaction avec la matière il a atteint un état d'équilibre avec une distribution d'énergie selon la loi de Planck*, en correspondance avec la température de la matière. Cette distribution d'énergie mesurée aujourd'hui correspond à 2.7 K. La confirmation la plus sûre du caractère de loi de Planck du spectre du rayonnement résiduel a été obtenue par le satellite américain COBE (Cosmic Background Explorer) en 1992.

C'est à George Gamow* que l'on attribue la prédiction du fond diffus cosmologique. Gamow a effectivement prédit l'existence d'un rayonnement issu du Big Bang, mais n'en avait pas prédit le spectre de corps noir. C'est A. G. Dorochkevitch et I. D. Novikov* qui en 1964 sont les premiers à prédire que le spectre du rayonnement doit être celui d'un corps noir et donc situé dans le domaine micro-onde. En fait, ces auteurs vont même jusqu'à citer l'antenne des laboratoires Bell comme le meilleur outil pour détecter ce rayonnement !

En 1965 les radio-astronomes* Penzias et Wilson, des laboratoires de la compagnie Bell Telephone, disposent d'une antenne qui servait initialement à la communication avec les satellites Echo puis Telstar 1. Ils avaient besoin de calibrer correctement l'antenne, et en particulier de connaître le bruit de fond généré par celle-ci ainsi que par l'atmosphère terrestre. Ils découvrent ainsi accidentellement un bruit supplémentaire d'origine inconnue. Ce bruit, converti en température d'antenne, correspondait à une température du ciel de 2,7 K, ne présentait pas de variations saisonnières, et ses éventuelles fluctuations en fonction de la direction ne dépassaient pas 10 %. Il ne pouvait donc s'agir d'un signal émis par la Voie lactée qu'ils cherchaient à découvrir. Ils ne connaissaient pas les travaux des cosmologistes.

Le déplacement cosmologique vers le rouge* et le rayonnement résiduel sont les deux meilleurs arguments en faveur du modèle du Big Bang*. Le rayonnement résiduel porte en lui une information sur les conditions qui régnaient dans l'univers alors que les étoiles et les galaxies n'existaient pas, et témoigne de ce que les propriétés de cet univers étaient très différentes.

REACTION

REACTION CHIMIQUE

REACTION (de rayonnement)

Force agissant sur un électron* ou sur une particule chargée en mouvement provenant de la réaction du champ électromagnétique du rayonnement* émis. C'est une action de la charge sur elle-même. Comme le mouvement d'une charge avec accélération provoque l'émission d'un rayonnement électromagnétique, ce système n'est plus fermé et l'énergie et l'impulsion ne s'y conservent pas. C'est un système dissipatif* et la force de réaction peut être considérée en partie comme un frottement*.

Cette force de frottement est proportionnelle à la vitesse de l'accélération. Une charge en mouvement uniforme ne frotte pas contre son champ propre. Cette force est responsable d'un amortissement des oscillations de la charge et par là même d'un élargissement de la fréquence du rayonnement émis (largeur naturelle de la raie spectrale*).

Si l'on évalue par le théorème de fluctuation-dissipation* l'intensité des fluctuations associées à ce frottement on trouve les caractéristiques du champ résiduel* de point zéro. C'est là un des arguments en faveur de l'existence de ce champ en électromagnétisme classique.

En électrodynamique quantique l'action du champ propre sur une particule chargée porte le nom de correction radiative* et donne un rôle au vide quantique*.

Comme pour le mouvement brownien la séparation de l'action du champ en un terme dissipatif* et un terme aléatoire* relève d'une démarche interprétative somme toute conventionnelle et donne lieu à des doutes quant à l'existence physique réelle des phénomènes correspondants, ce qui intervient dans la polémique scientifique sur l'existence des fluctuations du vide*.

L'existence de l'action du champ propre provient par ailleurs de la séparation a priori arbitraire entre une particule chargée et son champ, qui n'aurait pas lieu d'être dans une théorie plus unitaire.

REACTION-DIFFUSION (SYSTEME DE)

Les systèmes de réaction diffusion sont des systèmes impliquant des constituants transformés localement par réaction chimique et transportés dans l'espace par diffusion. L'évolution des concentrations est décrite par des systèmes d'équations différentielles (ou aux dérivées partielles) comportant deux types de termes, une fonction non linéaire décrivant l'effet de la transformation chimique et un terme classique de diffusion des produits. L'analyse de ces équations de réaction-diffusion montre que les phénomènes possibles sont liés à des bifurcations* où l'état d'équilibre perd sa stabilité lorsque les paramètres varient au profit d'états stationnaires non homogènes.. Ces bifurcations peuvent être analysées en détail en utilisant les méthodes de la théorie des systèmes dynamiques*

REACTION NUCLEAIRE

Transformation des noyaux* atomiques provoquée par la collision avec des particules élémentaires ou des noyaux.

Une réaction nucléaire en chaîne est une réaction nucléaire de division des noyaux d'éléments lourds sous l'effet de neutrons*, avec dans chaque acte augmentation du nombre de neutrons, de sorte qu'il apparait un processus de division auto-entretenu. Cette réaction entraîne un énorme dégagement d'énergie mis à profit dans la bombe atomique.

Une réaction thermonucléaire est une réaction de fusion de noyaux légers en noyaux plus lourds se produisant à de très hautes températures, dégageant une énorme énergie. Dans les conditions naturelles des réactions thermonucléaires ont lieu dans le soleil* et les étoiles*.

REALISME

Le réalisme est une attitude ontologique affirmant qu'il existe une réalité* indépendante de tout observateur. Les choses existent en dehors de nous. Comme le dit joliment Baudelaire : « Le monde comme si je n'étais pas là pour le dire ». Au réalisme s'oppose l'idéalisme*, le phénoménalisme* et l'empirisme*.

Au Moyen Age le réalisme est la doctrine selon laquelle les universaux* ou entités abstraites existent indépendamment de l'esprit. C'est une démarche platonicienne attribuant une réalité à des formes séparées. Elle s'oppose au nominalisme*. Elle inspire le logicisme* en mathématiques.

Aujourd'hui le réalisme est la doctrine selon laquelle les objets physique existent indépendamment de la perception.

Le réalisme reste une hypothèse métaphysique* tant que l'on ne fournit pas d'information sur la connaissance de cette réalité (Cf. Réalisme scientifique*)

REALISME INTERNE

Conception défendue par H. Putnam*, selon laquelle les entités abstraites et les éléments de réalité n'ont de sens qu'à l'intérieur d'un cadre théorique donné. Tout comme Carnap*, il n'envisage pas d'entités théoriques en dehors d'un cadre linguistique. Nous n'avons pas d'accès direct à la réalité, si même elle existe. La vérité (d'une description du monde) consiste en une possibilité rationnelle d'être acceptée-une sorte de cohérence idéale de nos croyances et de nos expériences, telles qu'elles sont représentées dans notre jeu d'idées- et

aucunement en une correspondance avec « un état des choses » indépendant de l'esprit et du discours.

Un "Comme si" qui n'offre aucun accès à un "Comme ça" hypothétique. Le "Comme si" est le seul réalisme observable. Einstein pensait cela.

REALISME/INSTRUMENTALISME

REALISME/NOMINALISME

REALISME SCIENTIFIQUE

Le réalisme scientifique est une attitude ontologique* (métaphysique*) et épistémologique* affirmant qu'il existe une réalité* indépendante de tout observateur* et que les théories scientifiques, même lorsqu'elles s'aventurent au delà de l'observable, se réfèrent (référence*) à cette réalité. Le but de la science est de donner une description littérale et objective* d'un monde fait de lois, d'entités, de propriétés et de relations, et le succès de la science confirme la justesse de cette attitude. C'est une théorie de la connaissance* des objets indépendants de notre esprit. L'antiréalisme* envisage que les objets de la connaissance sont constitués par notre esprit, par notre perception* ou notre raison*. Dans la science contemporaine, le principal problème épistémologique concerne l'existence des non observables, entités invisibles postulées par de nombreuses théories scientifiques.

La considération de l'histoire de la science tempère un peu la justification du réalisme scientifique par les succès de la science. Des théories en ont remplacé d'autres, qui furent considérées en leur temps comme de grands succès. Le choix des faits* et des concepts* dépend de l'époque et la notion de succès peut s'avérer relative. L'astronomie de Ptolémée* a eu un grand succès pendant des siècles avant d'être remplacée par celle de Copernic* et Kepler*. Les succès de la science contemporaine ne sont cependant pas tant théoriques que technologiques. La réalité de l'électron* est affirmée par l'électronique*, la réalité des gènes* est prouvée par les manipulations génétiques.

Si le déclin du mécanisme* marque un regain du positivisme*, le réalisme* n'est pas pour autant absent de la physique contemporaine. Ainsi la manière dont celle-ci parle des atomes* et des particules* manifeste un réalisme très cher à la communauté scientifique. Les attributions de prix Nobel pour la découverte de l'électron*, du

neutron*, du méson π^* , de l'anti proton, des particules J/Ψ , n'ont pas été envisagées comme des récompenses pour la découverte de nouvelles relations d'inférences entre observables.

Différentes doctrines ou attitudes sont opposées au réalisme scientifique (antiréalisme*). Sans être nécessairement opposées à l'existence de la chose en soi, elles nient toutes la possibilité d'une telle connaissance. Citons l'instrumentalisme*, qui regarde les objets de la connaissance de manière pragmatique comme utiles, le conventionnalisme*, qui considère que les vérités de la science sont des conventions humaines, le constructivisme*, qui affirme que la connaissance scientifique est une construction sociale où c'est nous qui faisons les faits, et le fictionnalisme*, qui conteste l'existence des objets de la réalité.

REALISME STRUCTURAL

Le réalisme structural pense qu'à l'intérieur d'un cadre théorique donné, ce ne sont pas les entités qui sont douées de réalité mais les relations entre ces entités. Les théories ne nous parlent pas des objets dont le monde est fait mais de structures* et de relations*. Une bonne théorie serait donc un reflet de la réalité structurale de la nature. Les structures mathématiques d'un "Comme si" livreraient donc les structures mathématiques du "Comme ça". Une telle pensée sous-tend toute l'activité de modélisation* et de simulation* de la Cybernétique* contemporaine, qui est parfaitement consciente de la multiplicité possible des réalisations d'une même structure par les modèles mis en place pour le fonctionnement d'une boîte noire*. Ceci apparaît clairement dans l'existence des différentes interprétations* de la Mécanique Quantique. Mais ceci se manifeste aussi dans l'existence de principes de correspondance* entre théories, où l'on voit une structure se maintenir d'une théorie à l'autre, comme dans les procédures de quantification* qui opèrent le passage de la mécanique classique à la mécanique quantique en maintenant la structure formelle de la mécanique classique.

Les explications quantiques sont elles structurales ? Oui et non. Les éléments d'un modèle de la théorie quantique ne ressemblent à rien dans le monde physique, et ne sont pas isomorphes aux éléments de ce monde. Ils ne représentent pas un système physique

neither resemble anything in the physical world, nor are they (even partially) isomorphic to them in any non-trivial sense of that systematically ambiguous term: if I am right, they don't ne représentent pas un systèmeeven represent any physical system. So I reject any account of structural explanation that appeals to an interesting model-world matching relation.²⁴ But structural aspects of the mathematical models employed in quantum theory are critical to their explanatory power.²⁵ By exploring the structure of the abstract mathematical spaces in which quantum states and operators are defined we can come to understand the ways that Born probability assignments to various NQMC's hang together. By itself this explains no physical phenomenon, since Born probabilities are just numbers, absent the physical conditions required for them to offer authoritative advice to an agent on how to apportion credences concerning certain of these NQMC's.²⁶ But it is by recognizing the commonality of abstract mathematical structure inherent in the family of models explanatorily deployed in a variety of physical contexts that we are able to gain a unified understanding of the diversity of phenomena thereby explained. That is the sense in which quantum explanations are indeed structural, a point that becomes especially clear when one *contrasts* the abstract structures inherent in quantum models with those inherent in models of classical physical theories.

Le réalisme structural s'inscrit dans une conception sémantique des théories*, où les termes sont interprétés comme des symboles* des choses. Ce qui fait de la théorie une classe de modèles* selon le type de symboles utilisés. Accepter une théorie signifie penser que le monde est semblable ou isomorphe à l'un de ses modèles, où tout au moins bien représenté par eux.

Le réalisme structural pose le problème du rapport des mathématiques à la réalité (Mathématiques et réel*, Géométrie et réalité*). Peut-on affirmer que les mathématiques et le monde sont construits selon les mêmes principes de la raison qui permettraient une représentation des relations logiques entre éléments du monde par des relations logiques entre éléments mathématiques ? Dans ce cas une logique universelle régirait le monde et les mathématiques. Ceci relève d'une certaine mystique à moins que l'on ne fasse intervenir la nature de la connaissance humaine.

REALITE (Cf. Niveau de réalité*) (Cf. Réel*)

REALITE VIRTUELLE

Réalité virtuelle ou quasi-réalité ou réalité artificielle. La juxtaposition des termes réalité et virtuel est due plus à des circonstances historiques qu'à une nécessité sémantique. On désigne par là des représentations*, simulations* ou simulacres* effectuées à l'aide de moyens informatiques et utilisés comme substitut du réel, de manière immersive et interactive. La réalité virtuelle cherche à mettre au point des systèmes qui donnent à l'homme la capacité de percevoir et d'interagir avec des données numériques en temps réel, de façon multi sensorimotrice et collaborative. Elle est réalisée à l'aide d'images de synthèse, d'un environnement virtuel en 3D dans lequel on peut évoluer, donnant l'impression d'une immersion dans un monde réel.

Les facilités de manipulation et d'expérimentation qu'offre la réalité virtuelle remplacent progressivement l'activité dans le monde réel par des activités « in silico ». Le virtuel en renfort du réel, reproduisant des situations réelles trop difficiles ou trop chères à créer.

Avec ses outils technologiques phares que sont le casque ou le gant de données, ou bien encore la salle immersive, la réalité virtuelle a de nombreuses applications :

Outils de simulation dans l'industrie manufacturière, l'aéronautique, l'automobile, le nucléaire, le bâtiment...

Formation par simulateurs (conduite de véhicules et d'avions, aérospatiale, médecine)

Applications médicales (simulations de chirurgie, mise au point de prothèses orthopédiques, traitement des phobies) .

Art numérique.

C'est le désir de réaliser une réalité virtuelle qui guide bon nombre de chercheurs en nanotechnologie*. Cette nouvelle discipline est en quelque sorte une soeur jumelle de la réalité virtuelle. Aujourd'hui, la nanotechnologie se limite essentiellement à la création de nouveaux matériaux, mais les pionniers du domaine, notamment Eric Drexler, l'auteur des "*Engins de création*", avaient en tête une vision autrement plus radicale : la "fabrication moléculaire" devait permettre de créer (ou détruire) n'importe quel type d'objet matériel. Ce projet reste pour l'instant utopique, et on ne sait même pas s'il sera réalisable un jour. Mais, les rêveries de la nanotechnologie moléculaire apparaissent comme l'horizon lointain des recherches d'aujourd'hui. Ainsi il existe déjà une méthode pour passer du "virtuel" au "réel". Ce sont les imprimantes 3D qui se montrent

capables de créer divers objets, à partir d'un modèle réalisé grâce à un logiciel 3D. L'opération se fait en superposant les unes sur les autres des couches du matériel de construction, en général un plastique. Ces imprimantes jusqu'ici très onéreuses, pourraient bien vite arriver entre les mains du grand public. Les imprimantes 3D apparaissent comme la première esquisse de l'usine moléculaire de Drexler. Mais les artefacts ainsi élaborés ont beau trouver leur origine dans le numérique, ils restent des objets bien solides, classiques.

RECESSION DES GALAXIES

La plupart des faits expérimentaux relatifs à l'univers dans son ensemble ont été obtenus par l'étude des systèmes d'étoiles-les galaxies.

Au début du siècle on a découvert que dans le spectre de la plupart des galaxies les raies de tous les éléments chimiques sont déplacées vers le rouge. C'est dans les années 1910 que Vesto Slipher, puis Carl Wilhelm Wirtz interprétèrent le décalage vers le rouge observé pour la nébuleuse spirale comme un effet Doppler*. Ils ne se rendaient pas compte de ce que la nébuleuse était en dehors de la notre- la voie lactée- et ils n'émirent aucune spéculation cosmologique. Ce déplacement peut être mesuré par la quantité z

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

où λ_0 est la longueur d'onde naturelle de l'élément. Si la vitesse d'éloignement de la galaxie est v , on a la relation $v=cz$.

En 1929 l'astronome américain Edward Hubble* a découvert que la vitesse v mesurée par le décalage vers le rouge est proportionnelle à la distance à laquelle se trouve la galaxie

$$V=Hr$$

où H est une constante dite constante de Hubble. C'est la loi de Hubble. Pour son établissement on utilise des mesures purement astronomiques de la distance, en mesurant la distance de luminosité à partir de la quantité de lumière reçue de cet objet. Hubble prouva en fait que les nébuleuses spirales sur lesquelles on avait observé le décalage vers le rouge étaient des galaxies et il mesura leurs distances en observant des étoiles céphéides variables. Il découvrit une relation entre le décalage vers le rouge d'une galaxie et sa luminosité, ce qu'il interpréta comme une récession par rapport à la terre proportionnelle

à la distance. Cette relation entre la distance et la vitesse n'a été mesurée avec précision que récemment. Hubble était dans l'erreur par un facteur 10.

A première vue la loi de Hubble semble contredire le principe cosmologique* puisqu'elle peut laisser croire que notre position est le centre à partir duquel s'éloignent toutes les autres galaxies. Il n'en est rien, si nous nous plaçons dans tout autre système stellaire nous trouverions la même loi de récession des galaxies.

Une des conséquences importantes de la loi de Hubble est la possibilité d'une mesure simple de la distance à une galaxie. Mais ce n'est pas l'essentiel. La récession des galaxies implique une diminution de la densité moyenne de matière dans l'univers avec le temps. Mais comme selon le principe cosmologique les galaxies emplissent tout l'espace, cela signifie que l'univers dans son ensemble s'élargit (expansion de l'univers*). Notons que Hubble lui-même n'a pas accepté l'interprétation relativiste de ses observations à savoir l'expansion de l'espace en lieu et place d'un déplacement réel des galaxies. Ce qui est un exemple intéressant de la pauvreté des faits expérimentaux par eux même en l'absence d'une théorie interprétative, en l'occurrence la relativité générale*.

RECOMBINAISON GENETIQUE

RECONNAISSANCE DES FORMES

RECURRENCE

RECURSIVITE

La récursivité est une procédure qui consiste à faire appel à elle-même dans la procédure. Ainsi de raisonner par récurrence*, de montrer une image contenant des images similaires, de définir un concept en utilisant ce concept. C'est ce que l'on appelle un procédé pour monter à la lune en se tirant par les lacets de ses souliers ou syndrome du baron de Münchhausen.

En informatique ou en logique un algorithme qui contient un appel à lui-même est dit récursif.

En art, le procédé récursif est appelé « mise en abyme » et c'est l'artiste Maurits Cornelis Escher qui en fait le plus grand usage ; il est en effet connu pour ses œuvres inspirées par la récursivité. De son côté, la publicité a aussi utilisé la récursivité, rendant célèbres en France « la vache qui rit » et Dubonnet.

Une procédure récursive introduit l'infini*.

REDUCTION (de l'état lors de la mesure en M.Q.)

Lors de la mesure d'une observable dans un état quantique pur en général superposition d'états propres* on obtient une valeur déterminée correspondant à un de ces états. L'état, initialement une superposition, se réduit à un seul de ces états, les autres états ayant brutalement disparus. D'une incertitude on est passé à une certitude.

La réalité de la réduction a toujours été l'objet de débats pour savoir si c'était un phénomène physique fondamental en soi ou si c'était un épiphénomène* d'un autre processus comme la décohérence*. Dans les dernières décennies le point de vue de la décohérence a gagné en popularité.

REDUCTIONNISME (Cf. a contrario Holisme*)

Le réductionnisme (latin, *reductio*, retour en arrière) est un principe méthodologique qui consiste à ramener des données, des problèmes ou des procédures à une forme commode pour l'analyse, au remplacement du complexe par du plus simple. La systématisation de ce principe fournit une conception qui affirme la possibilité de ramener complètement les phénomènes supérieurs à des phénomènes inférieurs comme fondement. Ramener par exemple le biologique au physicochimique ou le social au biologique. Le physicalisme* est une forme courante de réductionnisme.

Pendant longtemps le réductionnisme a constitué le but philosophique généralement admis pour les sciences de la nature. Cela supposait que la finalité de la science se trouvait dans la réduction des phénomènes complexes à des parties séparées simples, et que cette réduction fournissait des explications* significatives du phénomène. Réduire le comportement du Tout* à l'interaction des parties constituantes. Mais les phénomènes d'émergence* des formes supérieures du développement de la matière s'opposent au réductionnisme en terme de formes inférieures. La causalité descendante* prend le contrepied du réductionnisme.

En soi l'idée de ramener le complexe à du plus simple est une idée fertile qui a souvent réussi, témoins les succès du mécanisme* ou

de l'atomisme*. Le déchiffrement du code génétique ou la description des propriétés atomiques en fonction des noyaux et des électrons sont des exemples d'une telle réussite.

Mais on ne peut prendre comme méthodologie scientifique un réductionnisme systématique qui ignorerait les spécificités des niveaux supérieurs d'organisation. La spécificité du Tout* par rapport aux parties, des systèmes par rapport à leurs éléments s'y oppose bien souvent. Ainsi la notion de liaison chimique, spécifique du niveau moléculaire, a bien du mal à trouver une interprétation* en termes atomiques et électroniques.

Dans l'empirisme* se trouve à l'œuvre un réductionnisme qui cherche à débarrasser la philosophie de la métaphysique* et à ramener les connaissances scientifiques à des propositions sur les perceptions ou les expériences. Dans cette mesure le behaviourisme* en psychologie cherche à réduire le psychique à la somme des liaisons du type stimulus-réponse.

Certains aspects essentiels de la physique contemporaine sont viscéralement non réductionnistes et c'est un aspect que l'on peut simultanément considérer comme un échec ou une grande conquête de l'esprit. La constance de la vitesse de la lumière marque l'échec de la notion d'éther et fonde la relativité. La non réductibilité de la mécanique quantique à des discours ontologiques classiques fonde une ontologie quantique que l'expérience ne dément pas et a même pour conséquence inattendue un argument en faveur de l'éternité de l'univers. La physique classique n'est pas réductible à la mécanique quantique, parce qu'une propriété quantique comme la superposition des états* est fragile et peut être détruite par l'environnement (décohérence*).

REDUCTIONNISME EN BIOLOGIE

Le réductionnisme en biologie consiste à vouloir ramener tout ce qui concerne les phénomènes vivants, la vie*, l'évolution*, la physiologie, l'activité psychique à des processus physico-chimiques.

La biochimie* et la biologie moléculaire* couplées à la théorie générale des systèmes* et à la théorie des systèmes biologiques* sont les fers de lance de cette stratégie.

Si la discussion fondamentale porte sur l'origine et la nature de la vie*, les débats récents ont concerné la question de savoir si la génétique classique* pouvait se réduire à la biologie moléculaire*. L'autre problème est de savoir si la théorie de l'évolution est antiréductionniste à cause du principe de sélection naturelle*. On

discute aussi de la réduction de la biologie du développement* à la génétique moléculaire*.

D'une manière générale les phénomènes d'émergence* dans les systèmes complexes contrecarrent les visées réductionnistes, en imposant des démarches holistiques*, à moins que l'on ne considère l'étude des non linéarités* au fondement de l'émergence* comme une approche réductionniste universelle.

A la différence de la physique où les phénomènes occupent tout l'espace, la biologie étudie des systèmes complexes compartimentés où les compartiments se régulent les uns les autres.

Le développement des sciences cognitives* voit s'affronter à propos des phénomènes psychiques toutes sortes de tendances réductionnistes et antiréductionnistes. Pour certains cognitivistes, le cerveau est une machine de traitement de l'information* et l'activité de l'esprit doit être considérée dans un cadre proche de celui défini par la cybernétique*, ce qui est à priori antiréductionniste comme pour la mécanique quantique*. Mais pour de nombreux cognitivistes contemporains cette politique de la boîte noire est insatisfaisante, et l'on oscille sans cesse entre réductionnisme et non réductionnisme.

Le réductionnisme en biologie dont le caractère matérialiste* et physicaliste* est clairement affirmé, s'oppose directement au vitalisme* et compte un grand nombre de réussites scientifiques parmi lesquelles figurent toutes les découvertes récentes en biochimie, en biologie moléculaire, en physiologie, en neurobiologie, en neurophysiologie. Et pourtant récemment un type de réductionnisme mettant en jeu l'ADN dans la détermination complète de l'organisme est battu en brèche par la biologie post-génomique*.

REEL

Tout comme l'être, le réel est une notion très générale dont la définition précise est difficile. Le réel c'est tout ce qui existe. L'imaginaire* fait partie du réel. Le réel c'est tout ce qui se manifeste matériellement ou spirituellement. L'univers des possibles est réel. Le réel c'est l'objet de la connaissance*.

Les nombres entiers sont naturels et réels. Les cinq doigts de la main. Si l'on assigne aux points d'une droite d'être des nombres, ce sont des nombres réels, définissables à partir des nombres entiers. Mais si l'on veut attribuer un nombre à tous les points d'un plan on voit apparaître un nombre qui n'est pas réel, la racine carrée de -1, que l'on qualifie d'imaginaire*.

On voit se profiler là le fait que le réel n'est pas nécessairement une donnée mais résulte souvent d'une construction mentale. C'est le point de vue du constructivisme*.

Ainsi peut on définir deux attitudes vis-à-vis du réel : le réalisme* affirmant une existence objective de la réalité, qui se dévoile à l'homme dans le processus de la connaissance* , et le phénoménalisme* qui affirme que le réel dépend de l'activité cognitive de l'homme qui le construit dans ce cadre.

REFERENCE

La référence ou le cadre de référence spécifie le cadre du discours scientifique, sans lequel celui-ci n'a pas de signification. Cela peut être en physique un système de coordonnées*, un repère* ou un état de mouvement. Au cadre de référence se trouve lié un appareil de mesure*, soit un observateur*.

En logique la référence est la fonction par laquelle un signe* renvoie à ce dont il parle, à ce qu'il désigne ou dénote, à son référent*.

REFERENT

Objet réel ou imaginaire représenté par le signifié* d'un signe*.

REFLET (théorie du)

La théorie du reflet est le point de départ de la théorie matérialiste de la connaissance : les sensations et les concepts de l'homme sont des reflets plus ou moins corrects des objets et des processus de la nature. Reflet ne signifie point « contemplation passive ». C'est au contraire sur la base de la transformation pratique de la nature que l'homme apprend à découvrir les lois objectives du monde et à pénétrer l'essence des choses. La pensée de l'homme est un reflet de la réalité.

Le reflet s'apparente à la supervénience*.

REFUTABILITE (Falsifiabilité)

Critère épistémologique, introduit par K. Popper*, selon lequel une théorie ne mérite l'appellation de scientifique que lorsqu'elle est réfutable, c.a.d. qu'il existe une procédure méthodologique qui permette de la confronter à une expérience qui peut la mettre en défaut (expérience cruciale*), même si cette expérience n'a pas encore été réalisée. Une théorie ne peut être considérée comme scientifique

que si elle comporte en elle la possibilité d'une vérification ou d'une infirmation expérimentale.

Le calcul des probabilités quantique n'était pas une théorie réfutable jusqu'à ce que Bell* formulasse ses fameuses inégalités qui le distinguait du calcul des probabilités classique . C'est ainsi qu'une expérience cruciale a pu trancher, l'expérience d'Aspect*.

REGULATION

La régulation est l'ensemble des procédures qui assurent la stabilité d'un système dynamique, en particulier d'une machine. La machine à vapeur s'est vu associé un régulateur célèbre, le régulateur à boule de Watt. On pensait au XIX siècle que l'amélioration de la qualité des régulateurs passait par la diminution des frottements* mécaniques. L'effet bénéfique escompté se révéla catastrophique et l'on voulu changer même le principe des régulateurs. De fait Worms de Romilly était arrivé au résultat paradoxal selon lequel sans frottement tous les régulateurs étaient instables. Le rôle essentiel du frottement dans la régulation a été mis en évidence par le mécanicien russe I.A. Vichnegradski (1831-1895) dans son travail « Sur les régulateurs à action directe » (1876). Les ingénieurs comprirent alors qu'il fallait au contraire introduire des frottements pour la bonne marche des régulateurs. Sans frottement pas de régulation.

Le rôle fondamental de la dissipation* dans l'apparition d'un ordre stable se manifestait là pour la première fois, mais il faudra attendre cinquante ans et plus pour que cette idée essentielle s'impose progressivement dans tous les domaines. On doit considérer Andronov* et son école comme ayant joué là un rôle décisif en élaborant la théorie des systèmes auto-oscillants*. Le concept d'auto-organisation* dans ses acceptions multiples et malgré les différentes écoles de pensée donne à la dissipation* son statut réel de stabilisateur de la rétroaction* qui assure la régulation. En soulignant le caractère paradoxal du concept d'autonomie* qui à travers la notion de régulation implique l'ouverture du système.

La notion de régulation est donc très différente de celle impliquée par le mot anglais *regulation* qui sème la confusion en laissant croire que la régulation c'est l'application de règles strictes (*la réglementation*). C'est pourquoi l'anglais utilise le mot *control*, contrôle*.

REIFICATION

REISME

Doctrine selon laquelle seules les choses* existent, a contrario des entités de la raison. Nominalisme* et matérialisme* sont des réismes. Reste à savoir ce que sont les choses.

RELATION

La relation est l'existence d'un lien conceptuel ou matériel entre deux objets intellectuels ou matériels. Le lien de causalité est une relation. Les inégalités de Heisenberg* sont souvent appelées relations d'incertitude car elles établissent des relations entre observables non-compatibles* en M.Q. La logique* et les mathématiques* font grand usage de la notion de relation. Ainsi une fonction* est une relation entre deux grandeurs variables.

Aristote* essayait de caractériser les relations sur la base de considérations sémantiques* ou logiques*, en faisant intervenir les différences entre des propositions contenant des termes relationnels* ou relatifs* et celles contenant des termes absolus.

RELATIF

RELATIONNEL

RELATIONALISME

La notion de relationalisme s'oppose à celle de substantialisme* et s'est introduite historiquement à propos de la conception de l'espace* et du temps*.

La conception substantialiste de l'espace et du temps considère qu'ils existent comme entités indépendantes au même titre que la matière* et constituent un cadre pour l'existence des objets et des phénomènes. L'espace c'est l'étendue et le temps c'est la durée où sont plongés les objets matériels. Une conception qui remonte à Démocrite* où les atomes* et le vide* ont même statut, mais qui a pris corps chez Newton* avec son espace et son temps absolus et a envahit toute la physique classique*

La conception relationneliste de l'espace et du temps considère que ce sont les formes d'existence des objets matériels, l'espace exprimant l'existence même des objets et le temps exprimant la succession des états. L'espace traduit les relations entre objets, leur disposition mutuelle, et le temps les relations entre les états et les événements. La conception relationneliste considère que l'espace et le temps sont l'expression de la coordination de ce qui existe dans l'univers. Cette conception a été essentiellement développée par

Leibniz*. Citons le : « Je ne dis pas du tout que la matière et l'espace sont la même chose, j'affirme seulement que sans matière il n'y a pas d'espace et que l'espace en lui-même ne constitue pas une réalité absolue ».

Ce n'est pas pour autant que le relationalisme constitue une doctrine idéaliste* opposée au matérialisme*. Car le relationalisme reconnaît l'objectivité* de l'espace et du temps et son universalité, car rien ne peut exister en dehors de l'espace et du temps.

Le relationalisme inspire certaines présentations de l'électromagnétisme* ou de la mécanique quantique*.

Ainsi la mécanique quantique relationnelle est une interprétation relationnelle* de la mécanique quantique qui rejette les notions d'état absolu du système, de valeur absolue des observables ou d'événement absolu. La théorie ne décrit que la façon dont les systèmes influent les uns sur les autres au cours des interactions physiques. L'état et les quantités physiques se réfèrent toujours à l'interaction ou à la relation entre deux systèmes. Ainsi la théorie ne décrit pas le mode d'existence des systèmes physiques mais seulement l'interaction entre eux. L'état d'un système isolé n'a pas de sens et la description de tout système est réduite au réseau de relations qu'il entretient avec les systèmes environnants.

RELATIVISME

Principe méthodologique d'absolutisation de la relativité et du conditionnement du contenu de la connaissance*, soulignant la dépendance du processus de connaissance des éléments qui concourent à sa réalisation. **Besoins biologiques et psychologiques du sujet, contraintes logiques ou théoriques**

Релятивизм как методологическая установка восходит к учению древнегреческих [софистов](#): из тезиса [Протагора](#) «человек есть мера всех вещей...» следует признание основой познания только текучей чувственности, не отражающей каких-либо объективных и устойчивых явлений.

Элементы релятивизма характерны для [античного скептицизма](#): обнаруживая неполноту и условность знаний, зависимость их от исторических условий процесса познания, скептицизм преувеличивает значение этих моментов, истолковывает их как свидетельство недостоверности всякого знания вообще.

Аргументы релятивизма философы XVI—XVIII веков ([Эразм Роттердамский](#), [М. Монтень](#), [П. Бейль](#)) использовали для критики [догматов](#) религии и основоположений метафизики. Иную роль релятивизм играет в идеалистическом [эмпиризме](#) ([Дж. Беркли](#), [Д. Юм](#); [махизм](#), [прагматизм](#),

[неопозитивизм](#)). Абсолютизация относительности, условности и субъективности познания, вытекающая из сведения процесса познания к эмпирическому описанию содержания ощущений, служит здесь обоснованием [субъективизма](#).

RELATIVITE GALILEENNE

RELATIVITE GENERALE

La relativité générale ne naît pas de l'analyse d'un fait expérimental nouveau mais de l'analyse logique par Einstein des problèmes posés par la gravitation* et l'existence de repères non inertiels.

La relativité générale consiste à décrire l'interaction gravitationnelle comme étant non une force mais la manifestation de la courbure de l'espace-temps dont l'évolution est dictée par le comportement de la matière qui s'y trouve.

Le principe d'équivalence de la gravitation* est un principe qui affirme que localement les conditions de la relativité restreinte* faisant intervenir des repères inertiels* peuvent être remplies. Einstein interprète ce fait local en terme de géométrie de l'espace-temps. L'espace-temps serait non euclidien* tout en pouvant être considéré localement comme euclidien*. Cela signifie que l'espace-temps est courbe, il possède une courbure*, tout en pouvant être considéré comme localement plat. Dans chacune de ces zones restreintes le mouvement peut être considéré comme inertiel, si bien qu'au final le mouvement général peut être considéré dans tous les repères comme se produisant en l'absence de gravitation dans un espace-temps courbe. C'est la courbure de l'espace temps qui remplace la gravitation Tous les mouvements dans le champ de gravitation peuvent être considérés comme inertiels, c.a.d. ne sont pas dus à des forces gravitationnelles, mais se produisent dans un espace courbe où la place des lignes droites est occupée par les lignes les moins courbes, les géodésiques*.

Le principe de relativité* s'étend à tous les repères inertiels ou non à condition de formuler la physique dans un espace-temps courbe. Voilà la relativité générale, qui du même coup englobe un phénomène supplémentaire la gravitation*.

Dans cette nouvelle théorie de l'espace-temps et de la gravitation, la géométrie et la gravitation s'identifient. Le champ gravitationnel représente l'écart de l'espace-temps à la géométrie euclidienne, et la géométrie de l'espace-temps (sa courbure) représente la gravitation. Ainsi la répartition de la matière dans l'univers, à

l'origine du champ de gravitation, provoque la modification de la géométrie de l'espace-temps. La géométrie de l'espace-temps dépend de la matière.

La relativité générale modifie profondément notre conception de l'espace-temps. Dans la physique classique c'était un cadre ne dépendant de rien. Tout en liant l'espace et le temps, la relativité restreinte continue à donner un statut absolu à son nouvel objet l'espace-temps. Dans la relativité générale c'est la matière qui détermine l'espace-temps, qui s'avère comme une forme d'existence de la matière.

Les équations de la relativité générale expriment précisément le lien mathématique entre la courbure de l'espace et la distribution de la matière et son mouvement. Comme le mouvement dans un espace-temps aussi complexe modifie sans cesse la répartition de la matière, on comprend aisément que les équations de la relativité générale doivent être des équations non linéaires complexes.

La relativité générale est un des acteurs principaux de la géométrisation de la physique.

La vérification expérimentale de la relativité générale est essentiellement dans la vérification précise de la loi de Galilée de chute des corps. Par ailleurs la théorie ne prévoit pas de nouveaux effets spectaculaires, mais on vérifie que la lumière courbe bien sa trajectoire au voisinage des corps massifs.

La relativité générale est le cadre des théories cosmologiques* modernes.

RELATIVITE RESTREINTE

La relativité restreinte est une théorie qui exploite le fait que les équations de Maxwell ne sont pas invariantes dans une transformation de Galilée (relativité galiléenne*), mais le sont dans une transformation de Lorentz*.

En fait la théorie de la relativité restreinte découle de deux postulats :

Le principe de relativité* : les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme sont invariantes par rapport à des repères inertiels*

Le principe de constance de vitesse de la lumière : la vitesse de la lumière est identique pour tous les repères inertiels* et indépendante de la vitesse de sa source.

Deux principes qui semblent contradictoires pour le sens commun, mais dont la juxtaposition constitue précisément le cœur de la théorie de la relativité telle que l'a conçue Albert Einstein*. Car si le

premier principe n'est pas tout à fait nouveau, et consiste à étendre à l'électromagnétisme le principe de relativité de Galilée de la mécanique classique*, le second a pour conséquence première d'éliminer la possibilité d'existence d'un éther*, et de tenir compte ainsi des résultats de l'expérience de Michelson*.

Ces postulats deviennent compatibles si l'on abandonne les présupposés cinématiques habituels selon lesquels une horloge en mouvement mesure le même temps (« absolu ») qu'une horloge de même fabrication au « repos » et une règle en mouvement a la même longueur qu'une règle de même fabrication au « repos ». Einstein pose à la place une nouvelle cinématique des mesures de longueur et de durée dans laquelle une horloge en mouvement inertiel semble, quand on la compare à une horloge au repos, battre plus lentement (« dilatation du temps ») alors qu'une règle en mouvement inertiel longitudinal semble, quand on la compare à une règle au repos, être plus courte (« contraction des longueurs »). Ces contractions ne sont pas pour Einstein des effets absolus mais des effets de perspective néanmoins parfaitement observables et donc parfaitement objectifs*. L'observateur au repos attribue à la règle en mouvement une longueur inférieure à celle à la règle au repos lorsqu'il la mesure par rapport au repère inertiel en mouvement.. La synchronicité* doit être redéfinie en tenant compte des repères inertiels servant à définir le mouvement. C'est d'ailleurs historiquement une réflexion sur la synchronicité, ou l'accord des horloges, qui est à l'origine de la pensée d'Einstein. La nature de ces effets se manifeste clairement si l'on remarque qu'en vertu du principe de relativité ces effets sont réciproques, car on peut toujours considérer que c'est le repère inertiel en mouvement qui est en repos par rapport à l'autre. Ces contractions ne sont donc pas absolues mais relatives, ou apparentes car elles sont inféodées aux circonstances du mouvement relatif. Il est à peine besoin de souligner que les conclusions réciproques des observateurs s'opposent à toute décision concernant un mouvement vrai ou absolu.

Dans la théorie de la relativité restreinte les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme sont en fait invariantes dans une transformation de Lorentz*. Comme celles ci impliquent simultanément l'espace et le temps, on introduit à titre de construction mathématique la notion d'espace-temps* comme cadre de tous les évènements de la théorie.

On utilise souvent à la place du terme repère* le terme observateur*. Il ne faut jamais perdre de vue que lorsque l'on parle d'observateur* en relativité restreinte il ne s'agit jamais d'un

observateur réel, sujet de la connaissance, car on entend par là désigner essentiellement un système de référence auquel est lié l'observateur. Le langage en seul terme d'observateur permet une interprétation idéaliste* de la relativité qui masque son objectivité* réelle. Il y a là une confusion entre le relatif* et le subjectif*. Les grandeurs relatives sont aussi réelles que les grandeurs absolues. Les effets relatifs, effets de perspective*, sont aussi réels que les effets absolus.

Ainsi la vitesse d'un corps est relative au repère considéré, ce qui est un effet tout à fait réel.

De fait la longueur n'est pas une caractéristique du corps en soi, ce n'est pas un attribut* (pardon Mr. Descartes*), mais l'expression du rapport entre le corps et un repère* de référence. Il en est de même pour une durée temporelle. Ce rapport au système de référence n'apparaît clairement dans l'expérience qu'à des vitesses voisines de celle de la lumière, ce qui rend difficile de se libérer de l'illusion de la longueur et de la durée absolues.

La théorie de la relativité restreinte ne bannit pas de la physique les quantités absolues, mais se livre à une autre classification des quantités absolues et des quantités relatives. Dans la physique classique la longueur et la durée étaient absolues alors que les vitesses étaient relatives. Dans la théorie de la relativité restreinte la longueur et la durée deviennent relatifs, alors qu'apparaît une nouvelle grandeur absolue la vitesse de la lumière ainsi qu'une grandeur tout à fait nouvelle, inconnue de la physique classique, et à caractère absolu, l'intervalle d'espace-temps*.

Ainsi la théorie de la relativité restreinte n'introduit pas des effets dus à des forces liées à une nouvelle situation dynamique mais se borne à révéler la nature profonde de l'espace et du temps, dont le caractère relatif est masqué aux vitesses bien inférieures à celles de la lumière. En cela Einstein retrouve les contractions de l'espace et du temps déjà introduites par Lorentz et Fitzgerald, pour expliquer les résultats négatifs de l'expérience de Michelson, mais au lieu de les attribuer à l'influence dynamique de l'éther les attribue à la mise en cause de la nature de l'espace* et du temps*. Ceux-ci sont profondément liés à la matière* à travers le système de référence. C'est là une des plus grandes révolutions de la physique*.

La relativité restreinte détrône l'espace et le temps habituels au profit d'une entité nouvelle l'espace-temps*, ce qui entraîne une reformulation de toute la physique dans un cadre géométrique nouveau, une géométrie à quatre dimensions. Dans cette reformulation la relativité restreinte devient une théorie de l'invariance plutôt que de

la relativité. Elle entraîne ainsi une nouvelle géométrisation* de la physique, avec en particulier une redéfinition du rôle des grandeurs fondamentales de la mécanique. Ainsi à l'image de l'espace et du temps, l'énergie et l'impulsion s'unifient dans l'espace temps de la relativité restreinte en un seul et même concept intrinsèque, l'entité quadridimensionnelle énergie-impulsion, dite aussi quadri-impulsion.

C'est de considérations concernant la quadri-impulsion que découlent deux relations qui jouent un rôle fondamental dans la théorie : une relation qui relie l'énergie, la masse et l'impulsion et la fameuse relation entre l'énergie et la vitesse de la lumière : $E = mc^2$, qui établit une équivalence entre l'énergie et la masse. Une variation de masse correspond à une variation d'énergie et peut se traduire par l'émission ou l'absorption d'un rayonnement.

RELATIVITES

Une des questions fondamentales que la physique se pose, concerne la cohérence de la perception des phénomènes et des relations qui les unissent entre eux - les lois physiques - par des observateurs dont les points de vue diffèrent, selon qu'ils sont en mouvement les uns par rapport aux autres, situés en des lieux distincts de l'espace ou à divers moments de l'histoire du monde.

On dira qu'une loi physique est invariante pour une famille déterminée de repères (ou d'observateurs) ou qu'elle est symétrique par rapport à ceux-ci, si les observateurs sont en accord sur l'expression de cette loi, malgré leurs points de vue différents. Cette loi possède alors une propriété d'invariance eue égard à la relativité des points de vue.

Une Théorie de Relativité contient deux ingrédients: une famille de lois et une classe de repères (ou d'observateurs*). La (Théorie de) Relativité exprime l'invariance de ces lois pour cette classe de repères.

La Relativité Galiléenne* ou Classique exprime que les lois de la mécanique (sans gravitation) apparaissent absolument identiques dans tous les repères définis comme inertiels*, pourvu que les vitesses relatives des uns par rapport aux autres soient constantes.

La Relativité Restreinte* exprime que les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme (sans gravitation) sont invariantes par rapport à ces mêmes repères inertiels. La vitesse de la lumière, en particulier, est identique pour tous ces repères et indépendante du mouvement de sa source. Ce caractère absolu de la vitesse de la lumière crée un lien indissoluble entre l'Espace et le Temps. Les lois de la mécanique sont ainsi nécessairement reformulées et se placent désormais dans un

nouveau cadre géométrique à quatre dimensions: l'Espace-Temps de la Relativité Restreinte.

La Relativité Générale étend simultanément la classe des observateurs aux repères en mouvement accélérés et la classe des phénomènes physiques à la gravitation. Cette Théorie Relativiste de la Gravitation crée un lien indissoluble entre la Matière et l'Espace-Temps. Ce dernier se courbe et devient un nouvel acteur dynamique. La géométrie et la matière se conditionnent réciproquement dans la dynamique de l'histoire du monde.

RELAXATION

La relaxation est l'établissement dans un système à N particules d'un équilibre thermodynamique et statistique. Tous les processus de relaxation sont des processus de non équilibre avec dissipation* d'énergie dans le système et production d'entropie. Les processus de relaxation sont extrêmement variés selon les systèmes.

RENORMALISATION

En électrodynamique quantique* et en théorie quantique des champs*, élimination de la masse et de la charge de la particule "nue" au profit de la masse et de la charge observée pour la particule physique -c'est à dire la particule habillée par les interactions avec le champ.

La procédure de renormalisation, lorsqu'elle est possible, élimine les termes infinis de la théorie après les avoir amalgamés à la masse et à la charge. Elle rétablit la réalité physique face aux « dérives mathématiques ».

. D'un point de vue conceptuel, c'est une redéfinition de l'objet considéré, en ajoutant à ses caractéristiques initiales (typiquement sa masse) certaines classes d'interactions qui les modifient.

RENORMALISATION (GROUPE DE)

Le "groupe de renormalisation" fournit l'outil mathématique utilisé pour représenter le passage du local au global le long des transitions critiques, dans maints domaines de la physique : la renormalisation décrit alors un changement de mesure et d'objet, obtenu en intégrant les nouvelles classes d'interaction dues à la transition.

RENVERSABILITE

Les équations de la physique mathématique sont invariantes par renversement du temps, c.a.d. par le remplacement du paramètre t par $-t$. Ce faisant on n'introduit en rien une réversibilité du temps* physique et il est faux de dire que les équations sont réversibles alors que la véritable physique est irréversible.

REPERE

Un repère ou une base dans un espace vectoriel* est un ensemble d'éléments indépendants suffisants pour exprimer par une combinaison linéaire tout élément de cet espace. Cette notion mathématise la conception géométrique de l'ensemble des projections permettant de caractériser un objet.

REPERE INERTIEL

Un repère inertiel est un repère par rapport auquel un corps libre (ne subissant aucune influence extérieure) se déplace suivant un mouvement rectiligne à vitesse constante. Deux repères inertiels sont en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre.

L'importance des repères inertiels vient de ce que les lois de la mécanique classique sont invariantes par rapport à tous les repères inertiels (Relativité galiléenne*).

REPERE NON INERTIEL

Tout repère qui ne s'avère pas inertiel. Ainsi d'un repère se déplaçant selon une droite avec une accélération constante, ou d'un repère en rotation*.

Comme les lois de Newton de la mécanique classique* ne sont valables que par rapport à un repère inertiel*, les équations du mouvement d'un corps dans un repère non inertiel doivent comporter des forces* complémentaires, dites d'inertie*. Pour trouver les équations du mouvement dans un repère non inertiel il faut connaître les lois de transformation de la force et de l'accélération lors du passage d'un repère inertiel à un repère non inertiel.

La mécanique classique postule deux principes sur l'absolu du temps et de l'espace, c.à.d sur l'égalité des durées entre événements et sur l'égalité des distances entre corps dans tout système de repère mobile. Ces principes permettent d'écrire les équations du mouvement

d'un point matériel dans n'importe quel repère non inertiel, où la première loi de Newton n'est pas vérifiée.

REPONSE (Cf. Propriétés* de réponse)

REPONSE (Théorie de la)

REPRESENTATION

La représentation est soit l'image* d'un objet soit l'action de constituer cette image de l'objet. Il y a là mise en correspondance de deux réalités dont l'une représente l'autre. Cette capacité à représenter l'autre est appelée intentionnalité* par les philosophes et est considérée comme une notion centrale du fonctionnement de l'esprit humain.

L'hypothèse centrale des sciences cognitives* contemporaines est que la pensée peut être le mieux comprise en terme de structures de représentation dans l'esprit avec des procédures de calcul qui opèrent sur ces structures. Connaitre c'est représenter.

La représentation suppose une affinité, un isomorphisme*, une analogie* ou une ressemblance liés au système d'interprétation dans lequel la représentation s'insère. La langue naturelle est un système de représentation de la réalité.

Dans la philosophie matérialiste (marxiste) la représentation est dite reflet* de la réalité matérielle, et se voit attribuer un rôle universel dans la matière.

En Mécanique Quantique*, les observables* sont représentées par des êtres mathématiques, appelés opérateurs*, et dont la signification peut dépendre du système d'interprétation* du formalisme. Dans son interprétation pragmatique* courante, la M.Q. ne représente rien, mais se borne à calculer les résultats possibles des observations*. John Bell*, arguant du fait que l'expérience n'est qu'un outil, rappelle que le but ultime de la philosophie naturelle est la compréhension du monde, et que la M.Q. trahit cet idéal.

La représentation se substitue à la chose*, mais la chose n'est pas sa représentation. Le nom* de la chose est cette chose en elle-même, mais la chose n'est pas ce nom. Dans le premier cas le verbe être est utilisé pour indiquer un lien (supervénience*) alors que dans le deuxième cas il l'est pour exprimer une identité.

Une problématique récurrente dans l'histoire des religions.

La fameuse querelle de l'icône* finit par conclure que l'icône est une image* de Dieu mais que Dieu n'est pas dans l'icône. L'icône est vide. C'est un point de vue nominaliste*.

La querelle de l'onomadoxie (Glorification du Nom) en Russie orthodoxe contemporaine est l'héritière de la tradition hésychiaste* selon laquelle « Le nom de Dieu est Dieu », mais « Dieu n'est pas le nom de Dieu ». C'est un point de vue réaliste* !

REPRESENTATION DE FOURIER (Cf. Fourier* (représentation de))

REPRESENTATION DISTRIBUEE

Le concept de représentation distribuée est le produit de développements dans les neurosciences* et dans la conception connexionniste des fonctions cognitives. Une représentation est dite distribuée lorsque la signification n'est pas attachée à une seule unité symbolique, mais émerge de l'interaction d'un ensemble d'unités disposées en réseau. Dans le cerveau, la signification n'est pas localisée mais est distribuée sur un réseau de neurones. C'est une démarche opposée à celle symbolique des adhérents de l'intelligence artificielle* classique.

REPRESENTATIONALISME

Le représentationalisme est la description de la manière dont se constitue la représentation* à l'intérieur de la perception*. C'est la réponse à la question de savoir de quoi sommes-nous conscients dans la perception.

RESEAU NEURONAL

RESONANCE

Réponse relativement importante et sélective d'un oscillateur* à une perturbation périodique dont la fréquence est voisine de celle de ses vibrations propres (modes normaux*). Lors de la résonance il se produit une brusque augmentation de l'amplitude des vibrations forcées. C'est la raison pour laquelle on interdit à la troupe de marcher au pas cadencé sur un pont. Les résonances affectent aussi

bien les systèmes linéaires * que les systèmes non linéaires* dont les vibrations propres ne sont pas sinusoïdales

RESONANCE (THEORIE quantique de la)

RESONANCES (Particules résonnantes)

Etats d'excitation de courte durée des hadrons.

A la différence de toutes les autres particules instables les résonances disparaissent essentiellement sous l'influence des interactions fortes. Elles apparaissent dans la diffusion des mésons* sur les nucléons*.

RETOUR DE POINCARÉ (Récurrence de Poincaré)

Poincaré a démontré un théorème général, selon lequel toute trajectoire de phase d'un système dynamique conservatif* dont l'espace de phase* est de volume fini, revient tôt ou tard dans un voisinage aussi petit que l'on veut d'un état initial, et ce de façon répétée. Eternel retour dans une portion de l'espace de phase correspondant à un système fini.

Alors que l'on pensait qu'en général, si le système n'est pas périodique ou faiblement quasi périodique, ce retour nécessite un temps très long, on a trouvé un exemple où ce temps de retour est relativement court. C'est ce qui est présenté dans un article de vulgarisation de la revue « Pour la Science » en 1987.

Partant d'une reproduction d'une photographie de H. Poincaré, on lui applique une transformation du type de la transformation du boulanger*, et on itère le procédé. Dès la troisième itération, il ne reste plus grand chose du visage du grand homme, l'image est broulée (chaos) mais, de manière miraculeuse, après 241 itérations, Henri Poincaré est de retour, tout au moins sous forme reconnaissable. Cet exemple, même s'il est frappant, n'illustre *en aucun cas* le théorème de Poincaré*. Ce phénomène est en fait le résultat d'une série de petits "miracles" de nature arithmétique.

Le théorème de Poincaré semble en contradiction avec l'irréversibilité* ce qui a déclenché de nombreuses polémiques scientifiques. En réalité, en raison du théorème de récurrence de Poincaré, l'entropie d'un système confiné dans un volume borné, possédant une énergie finie et qui serait idéalement isolé de toute interaction avec son environnement, ne pourrait pas augmenter de façon monotone. En effet, un tel système peut revenir aussi près qu'on le souhaite de son état initial à condition d'attendre suffisamment

longtemps. Cette objection au second principe de la thermodynamique (faite à Boltzmann lorsqu'il a fait connaître son théorème H) est connue depuis les débuts de la thermodynamique statistique sous le nom d'objection de récurrence de Zermelo. En fait, le caractère irréversible de la croissance de l'entropie des systèmes « isolés » résulte du fait qu'aucun système n'est jamais parfaitement isolé de son environnement. De l'information sur l'état du système se diffuse dans l'environnement. Ce mécanisme de perte d'information par diffusion dans l'environnement est à l'origine de la validité de l'hypothèse dite du chaos moléculaire, hypothèse sur laquelle repose l'équation d'évolution irréversible de Boltzmann et, par voie de conséquence, le théorème H de Boltzmann (prouvant la croissance monotone de l'entropie de Boltzmann d'un gaz parfait « isolé »).

Ces retours de Poincaré sont manifestement contradictoires avec l'égalisation des températures, des pressions et des compositions dans un système thermodynamique. Face à cette contradiction il y a plusieurs réponses classiques mais insatisfaisantes, si le temps de retour de Poincaré n'est pas forcément si long que cela. On ne peut donc argumenter en disant que la notion de trajectoire reste précise pour des temps bien inférieurs au temps de retour. En principe Poincaré a raison et pour un système strictement isolé il existe en effet cette corrélation mystérieuse entre les conditions initiales et finales (après le temps de retour de Poincaré). Mais nos systèmes ne sont pas isolés et des perturbations très petites, comme l'attraction des planètes, suffisent à détruire ces corrélations. La réponse véritable est liée aux mouvements chaotiques. C'est parce qu'un système est « sensible aux conditions initiales » et dépend de milliards de paramètres, tandis que nous n'en mesurons que quelques uns (essentiellement ceux de nature statistique) que nous constatons une apparence d'irréversibilité et que le temps de retour de Poincaré est très grand, bien plus grand que l'âge de l'Univers. Nous atteignons ainsi l'irréversibilité physique de nos expériences en dépit de lois conservatives et réversibles.

Le rapport entre la récurrence de Poincaré et le second principe de la thermodynamique reste un débat ouvert.

RETROACTION (Feedback)

La rétroaction, ou en anglais *feedback*, est un concept que la cybernétique* a contribué à populariser. Il s'agit là d'une action que le signal de sortie peut exercer sur le signal d'entrée d'un système cybernétique, et donc sur le fonctionnement même du système. Le signal d'entrée se trouve donc contrôlé et régulé par le signal de sortie.

Ce retour d'information peut physiquement s'effectuer en dehors du système- grâce à un observateur par exemple, ou à travers le système. Dans la pratique l'identification des caractéristiques d'un feedback est souvent un problème physique et technique difficile.

Le feedback est essentiel dans le fonctionnement des dispositifs de régulation automatique, comme le régulateur de Watt. Dès le XIX^{ème} siècle les travaux de Maxwell*, Wichnegradsky* et Stodola, ont montré le rôle simultané du feedback et du frottement dans ces dispositifs.

En 1928, le russe Andronov* a montré le rôle joué par le feedback dans un mécanisme physique universel : l'auto oscillation*. Les auto oscillations constituent le paradigme fondateur du concept général d'auto organisation*.

L'identification de la rétroaction, action modifiant le milieu par le fonctionnement même du système, reste l'enjeu majeur de bien des théories scientifiques, de la biologie à la physique théorique, en passant par la théorie des instruments de musique. La rétroaction modifie les causes des phénomènes et participe ainsi à la mise en place de causes descendantes*.

RETROCAUSALITE

C'est la situation ou un évènement futur ou possible entraîne un évènement passé. L'effet précède la cause temporellement mais non causalement. Il n'y a pas finalité*.

C'est le sujet d'une discussion philosophique qui a débuté dans les années 50.

En physique le problème de la rétrocausalité est celui de la renversabilité* des équations des théories physiques fondamentales et la question de savoir pourquoi en général la Nature retient la solution qui va dans le sens du temps. Ainsi en théorie électromagnétique le rayonnement d'une charge accélérée est soit avancé soit retardé. Expérimentalement il est retardé. Wheeler* et Feynman* l'expliquent par le fait qu'il n'y a pas d'émission dans le simple vide, mais que l'émission ne se produit qu'en présence d'un absorbeur. Une charge isolée ne rayonne pas, mais rayonne sous l'influence des autres charges de l'univers. En fait il n'y a pas d'émission spontanée* sans intervention du champ fluctuant du vide quantique* correspondant au système électron absorbeur.

La rétrocausalité a été invoquée pour interpréter l'éventuelle existence de particules se déplaçant plus vite que la lumière, les tachyons, ou a été utilisée pour considérer le positron* comme un électron qui remonte le temps.

REVE DE D'ALEMBERT

Le rêve de d'Alembert* est un écrit de Diderot* qui y expose des idées de Philosophie Naturelle*, sous forme d'un dialogue entre Mademoiselle de Lespinasse qui veille sur d'Alembert et le médecin Bordeu, autour de rêves présumés de d'Alembert.

La philosophie de l'*Encyclopédie** a évolué au cours des vingt années de l'édition du dictionnaire raisonné de 1751 à 1765 et on peut considérer *Le Rêve* comme un de ses aboutissements. En effet, *Le Rêve* propose la discussion de nombreux points de l'évolution scientifique du XVIII^e siècle dont les enjeux sont philosophiques. Que ce soit l'introduction de formes substantielles* dans le problème de la notion de force ou l'affirmation de la préexistence des germes, il s'agit pour Diderot et D'Alembert de leur opposer une méthode (logique ou naturelle) pour appréhender la compréhension de l'univers matériel. Aussi, *Le Rêve* constitue-t-il pour la philosophie un point de départ pour une autre manière de penser. Ce que Kant* a réalisé.

Le raton laveur* a suggéré de faire ressusciter d'Alembert au XXI^e siècle et de le faire méditer en relisant Diderot, tout en maugréant d'avoir servi d'agent pour exposer les idées philosophiques de son compère.

@

« Einstein* me l'a bien dit : « Les atomes* existent » mais « ils n'ont pas d'âme » et « Dieu ne joue pas aux dés » .

Apprenant que j'avais ressuscité en plein XXI^e siècle, Einstein avait tenu à me rencontrer, moi, d'Alembert.

N'étais je pas l'auteur de l'équation des ondes* ?

Or voilà que maintenant les atomes aussi ont leur équation et leur onde. L'équation de Schrödinger*, l'homme qui faisait jouer son chat à la roulette quantique.

Tout ce que l'on peut savoir sur un atome est contenu dans cette équation. Elle livre la fonction d'onde* de l'atome. L'état* de l'atome. Sa forme substantielle* aurait dit Leibniz*. Ce qui fait que l'atome est l'atome.

Mettez des atomes ensemble ils mettent leurs états en commun pour former une molécule. La molécule a de nouvelles propriétés différentes de celles des atomes. On peut même obtenir de très grandes molécules qui ont des propriétés tout à fait étonnantes. Le monde

merveilleux des plastiques. Le monde magique des protéines* et de l'acide désoxyribonucléique, l'ADN*, qui permettent l'apparition de la vie. Et tout cela à partir de quatre compères innocents : le carbone, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène. Ils cachaient bien leur jeu... Pensez donc, la vie à partir du charbon !!!!

La physique d'aujourd'hui ne ressemble pas du tout à celle que nous imaginions, nous les héritiers de la Renaissance.

C'était une physique débarrassée du joug d'Aristote. Une physique des actes. Une physique des qualités* manifestes.

Sus à la potentialité*, aux qualités occultes*. A tout ce qui arrête le progrès de la Philosophie Naturelle. Notre grand Newton avait été formel à ce sujet. Et Molière avait suffisamment raillé la vertu dormitive.

Mais nous avons été impénitents. Attribuer aux atomes une sensibilité cachée, passive, c'était déjà glisser à nouveau sur la mauvaise pente. Formuler comme je l'ai fait la mécanique, en considérant non seulement le mouvement véritable, mais des déplacements virtuels auxiliaires, était un pas fatal. Inventer l'énergie potentielle, c'était brouiller l'esprit de tous les potaches à venir et ouvrir la porte à un possibilisme échevelé.

Toute la physique s'y est engouffrée en devenant une grande épopée des extravagances du possible*. La probabilité*, le champ*, l'information*, ne parlent que du possible. Aristote triomphe. Nous vivons dans un univers de dispositions*, de propensions*. Vive le propensiton.

Dis moi ce que tu es disposé à faire, je te dirai qui tu es.

Cela grouille de particules virtuelles*, de mondes multiples.

Rien n'est aussi réel que ce qui n'existe pas mais est susceptible d'exister.

La force de la physique est dans la manipulation du possible. La Grande Illusion.

@

Fine mouche la Lespinasse. Il faut en croire l'intuition féminine. Voilà bien la question. Comment suis je resté moi pour les autres et pour moi, alors que toutes mes molécules ont changé ?

C'est que tout est dans le mouvement.

Ce ne sont pas les molécules qui sont la vie, mais leurs mouvements.

Ce ne sont pas les acteurs qui comptent, mais la pièce que l'on joue.

Dans un match de football l'entrée des remplaçants ne change pas le match, mais lui permet de continuer dans de bonnes conditions.

Le mouvement doit se maintenir dans les mêmes limites raisonnables, malgré tous les aléas de son existence.

Le mouvement doit être stable.

Comprenez le bien, la rigidité a toujours été l'ennemie de la stabilité. Un système rigide casse et ne s'adapte pas.

Les voûtes de nos cathédrales gothiques résistent au vent car elles sont construites de manière souple et peuvent se déformer légèrement.

Une voiture automobile se maintient sur la route grâce à la souplesse de ses amortisseurs.

Une horloge maintient son rythme par le jeu subtil du frottement.

Dans la vie toutes les molécules sont sans cesse remplacées mais le grand mouvement qui les mobilise garde son caractère.

Il faut changer tout en ne changeant pas, pour s'adapter et survivre. Le mouvement doit conserver ses singularités quoiqu'il arrive. Votre nez reste votre nez, même s'il change de taille.

Le grand mathématicien René Thom* ne disait pas autre chose lorsqu'il promouvait la Stabilité Structurale* au rang de premier principe de la Philosophie Naturelle. Ce qu'il n'avait pas prévu, c'est que ses collègues russes démontreraient que les mouvements chaotiques étaient structurellement stables.

La stabilité de la Nature cache un grand Chaos.

Pour survivre soyez imprévisibles. Le lapin le sait bien face au chasseur.

Et quant à Dieu, s'il a tout prévu, le destin de chaque individu lui échappe.

Gros malin, l'astrologue qui cherche à comparer un mouvement chaotique imprévisible comme la vie, avec le mouvement périodique prévisible des astres.

@

Nous vivons dans un monde aux flux incessants.

La réalité se dérobe.

Comment s'accorder sur la définition des objets et des évènements ?

Comment vous dire que ma chatte a un merveilleux pelage, sinon en vous parlant d'une chatte, la mienne, délicate et attachante. C'est ce glissement du ma au une, de ma chatte au signe chat, qui rend la connaissance du monde et la communication possibles.

Pour comprendre le monde il faut l'inventer. L'inventer tous ensemble. C'est là la fonction des symboles* et des abstractions*. Nous représentons le monde avec des signes* qui ne ressemblent pas aux objets. Le mot table ne ressemble pas à une table. Que dire du mot électron ?

Ce sont des acteurs abstraits dans le jeu du langage. Cher Wittgenstein*.

Pour s'assurer de la stabilité des choses, on les soustrait aux vicissitudes du réel, en les remplaçant par des abstractions.

Le jeu du réel se rejoue sur une autre scène, avec d'autres acteurs.

Une démarche chère à Platon* qui proclamait que la véritable réalité est dans des idées abstraites.

Notre époque l'a bien compris.

Connaître le monde ce n'est pas en construire une copie photographique plus ou moins fidèle. C'est l'organiser à notre façon, et confronter ce modèle avec nos perceptions et nos actions.

Prenez par exemple le problème des couleurs*.

La couleur est une perception construite par notre cerveau, et non pas une sensation directement liée à la nature. Il n'y a pas de couleurs dans le monde physique. C'est nous qui créons les signes de couleur pour organiser une expérience complexe.

Nos peintres abstraits ou nos physiciens théoriciens se livrent au même jeu. Réinventer le monde pour notre enchantement. Ce sont de bâtisseurs de signes.

@

Quand on se réveille comme moi au XXI^e siècle, on ne reconnaît plus rien.

Qu'est devenue la matière réduite à des équations ?

L'énergie se dissimule sous forme de gaz, d'électricité ou d'essence.

Mais le maître mot de notre époque, c'est l'information*.

Le mouvement* lui même n'en revient pas. On veut nous faire croire que ce n'est pas le mobile qui bouge, mais l'information sur le mobile qui évolue. Pour aller de l'avant il suffit de savoir comment se transforme l'information. Quelle information faut il avoir à un instant donné pour pouvoir prédire ce qui va advenir immédiatement ?

L'information minimale nécessaire à chaque instant pour déterminer toute l'évolution ultérieure, c'est ce qu'ils appellent l'état* du système. Notez bien l'état, et non pas l'être*.

C'est à chaque instant un concentré de mémoire du système.

Encore faut il que cette concentration soit possible.

Dans de nombreux systèmes ou processus une telle concentration peut s'avérer difficile. Pour de l'huile ou de la boue qui s'écoulent par exemple.

C'est aussi le cas pour les sociétés humaines où l'on ne peut à chaque instant totaliser une information qui permettrait de repartir à zéro vers le futur. Le passé colle trop fort à la semelle de vos souliers. L'histoire est comme un fleuve de boue où les évènements anciens ressurgissent sans cesse.

Pensez donc, un globule instantané d'information nécessaire comprimée. Un vrai pactole.

Et pourtant c'est ce qui se produit dans la mécanique ordinaire, sans frottement. La connaissance à chaque instant de la position et de la vitesse du mobile suffit pour prédire grâce aux lois du mouvement la position et la vitesse à l'instant suivant. C'est cet ensemble de la position et de la vitesse que l'on nomme l'état.

Le mouvement consiste alors au passage d'un état à un autre selon une loi donnée une fois pour toute. C'est ce modèle mathématique abstrait que l'on appelle un automate. A partir d'une information initiale, il évolue tout seul selon la loi. On a même inventé une machine qui se comporte comme un automate universel : l'ordinateur.

Nourrissez le avec des nombres, il va accomplir le programme que vous lui avez fourni.

La nature fait elle autre chose que de moudre de l'information ?

Tout paraît simple. Mais en fait bien des surprises vous attendent. L'automate ne laisse pas deviner simplement son état final.

L'automate va-t-il s'arrêter tout seul ?

L'état final peut il avoir un caractère surprenant ?

Des actes répétitifs innocents peuvent ils laisser émerger de la nouveauté ?

Voilà la grande surprise du XX^e siècle que je voudrais vous faire partager en vous faisant jouer avec un automate particulier, un automate cellulaire.

Des éléments sur une grille peuvent chacun se présenter sous plusieurs aspects. Deux aspects par exemple : noir ou blanc. Une règle indique à chaque élément comment changer d'aspect selon les aspects des éléments de son environnement. Et l'on recrée un univers possible.

REVERSIBLE (PROCESSUS)

Certains processus physiques sont réversibles, ce qui signifie qu'il est théoriquement possible-sinon vraiment réalisable, de les faire se dérouler en sens inverse, tout comme on peut rebobiner un film. Tous les processus mécaniques sont réversibles pourvu qu'ils soient suffisamment lent et ne soient pas le siège d'une création et d'une propagation macroscopique de chaleur. Un processus thermodynamique réversible est un processus infiniment lent dans un système fermé. Il faut distinguer la réversibilité, processus physique, de la renversabilité*, processus conceptuel de changement du sens de déroulement du temps dans une équation mathématique liée à une dynamique.

REVOLUTION GALILEENNE

Galilée* est au centre d'une révolution scientifique* qui va marquer la science jusqu'à aujourd'hui

REVOLUTION SCIENTIFIQUE

Tout comme au plan politique une révolution est le remplacement d'un régime par un autre, une révolution est le remplacement d'un paradigme* par un autre. C'est une notion qui s'est essentiellement introduite à la suite du livre de Kuhn* « La structure des révolutions scientifiques » en 1962.

Parmi les principales révolutions scientifiques citons : le remplacement de la cosmologie de Ptolémée* par la cosmologie copernicienne, la révolution galiléenne*, le remplacement de la vision du monde électromagnétique selon Maxwell* par la vision relativiste selon Einstein*, le développement de la physique quantique

remplaçant la mécanique classique dans le domaine microphysique, la théorie de l'oxydation de Lavoisier remplaçant la doctrine du phlogiston.

L'importance d'une évolution scientifique ne suffit pas pour qu'elle soit une révolution même si les contemporains la vivent comme telle. Les mathématiques dites modernes et leur nouveau style, le développement de la biologie moléculaire* ou l'apparition de la théorie du chaos* ne sont pas à proprement parler des révolutions scientifiques.

Il n'est pas tout à fait clair si la notion de révolution scientifique apporte à l'histoire des sciences un concept utile.

RHETORIQUE

RIEN (Cf. APOPHATISME)

Catégorie ontologique désignant l'absence d'une quelconque qualité, détermination ou existence. A un tel concept s'oppose celui d'être ou d'existence. Dans l'histoire de la philosophie le rien est souvent identifié au non-être (néant*). Dans la physique, le rien est souvent considéré, à tort, comme une des caractérisations possibles du vide.

Mais le rien est moins absolu que le néant* ce que prouvent les usages variés du mot rien. Littré en distingue 26 sens différents allant de quelque chose*, à peu de chose au néant.

Le rien apparaît comme une catégorie indépendante dans la doctrine de Démocrite* sur l'être (les atomes) et le vide (rien), en étant considéré comme une condition nécessaire pour l'existence de la multiplicité, du mouvement et du changement.

Le rien joue un rôle important dans les ontologies de Platon* et d'Aristote*. C'est tantôt un non-être absolu- la privation, tantôt une catégorie du monde sensible en attente d'être- la matière. Le rien est alors la racine d'une possibilité passive.

Dans la philosophie du Moyen-âge les représentations antique du rien comme matière ont été utilisées pour l'interprétation du processus de création du monde à partir de rien (ex nihilo) par Dieu.

Mais la catégorie du rien est aussi caractéristique des traditions néo-platonicienne* et médiévale de théologie négative, dans laquelle la voie la plus adéquate pour s'approcher de Dieu par la pensée, consistait en un rejet successif des déterminations, laissant apparaître la plénitude de Dieu. Une identification de Dieu avec Rien se rencontre

dans la philosophie du Moyen-âge (La Kabbale juive ou Maître Eckhart et la mystique allemande) et dans la pensée de Nicolas de Cues.

A force d'absence de détermination le Rien peut devenir le Tout. En n'étant rien de particulier, il se donne une vocation à être un support d'universalité. C'est sans doute le destin du Vide Quantique. Substrat* informe en attente de Tout.

RINDLER (PARTICULES DE)

ROBERTSON (INEGALITES DE) (Cf. Heisenberg .Relations d'incertitude)

Ce sont des inégalités entre les dispersions statistiques d'observables non-compatibles* déduites de la non-commutation des opérateurs* correspondant en M.Q. c'est l'expression mathématique rigoureuse de ce que l'on appelle communément les relations d'incertitude de Heisenberg*.

ROBOTIQUE

ROTATION

Mouvement circulaire d'un objet. Dans un plan l'objet tourne autour d'un centre. Dans un espace tridimensionnel l'objet tourne autour d'une ligne appelée axe. Si l'axe de rotation se trouve à l'intérieur du corps, on dit que le corps est en rotation sur lui-même, ou possède un spin*. Un mouvement de rotation autour d'un point extérieur est appelé mouvement ou rotation orbitale, comme c'est le cas pour la terre autour du soleil.

ROULEAUX DE BENARD

RYTHMES BIOLOGIQUES

Alors que certains grands rythmes biologiques sont connus depuis fort longtemps (sommeil-éveil, rythme cardiaque, rythme respiratoire, rythme locomoteur) leur explication physiologique et biochimique n'a commencée que fort récemment. Il aura fallu pour

cela que l'on introduise la notion d'auto-oscillations* (1927) et que l'on observe les premières réactions chimiques oscillantes, comme la réaction de Belousov-Zhabotinsky*(1950-1970). Le monde vivant s'avère un monde temporellement organisé grâce à de nombreuses auto-oscillations, en général synchronisées, responsables de la création de rythmes autonomes.

Le développement et le fonctionnement harmonieux d'un organisme requiert une coordination précise de myriades de processus biologiques entremêlés. L'organisation temporelle joue un rôle crucial dans la coordination de phénomènes dynamiques aussi variés que la progression à travers le cycle cellulaire, le traitement de l'information, l'adaptation à un environnement périodique, ou la réponse à des signaux extracellulaires ou intracellulaires. Les comportements rythmiques sont très fréquents. Sans eux verrions nous passer le temps ? L'alternance du jour et de la nuit, le cycle des saisons nous rappelle que l'environnement est périodique. La vie elle-même est rythmique : des générations périodiques des potentiels d'action* dans les neurones ou les cellules cardiaques jusqu'au cycle de division cellulaire et aux rythmes circadiens, de nombreux processus cellulaires essentiels ont un caractère oscillatoire.

Les rythmes ont des périodes très variées allant de la milliseconde à la seconde pour les rythmes neuraux ou cardiaques, de la seconde à la minute pour les oscillations biochimiques, de la minute à plusieurs heures pour les rythmes hormonaux, d'à peu près vingt quatre heures pour les rythmes circadiens, de 28 jours pour les rythmes ovariens à des années pour les rythmes écologiques et épidémiologiques.

Ces comportements oscillants sont d'origine moléculaire, ils résultent de multiples processus de régulation. Ainsi les rythmes neuronaux et le rythme cardiaque reposent sur la régulation de canaux ioniques*. Des oscillations biochimiques, dont l'exemple le plus connu est celui des oscillations glycolytiques, sont dûes au contrôle de l'activité enzymatique. Le contrôle de l'expression des gènes sous tend les rythmes circadiens.

Résultant des processus de rétroaction* au sein des systèmes biologiques*, les rythmes fournissent un exemple emblématique de la biologie des systèmes. Ils représentent une propriété émergente* des réseaux de régulation. Leur étude intègre les données dans des modèles mathématiques d'équations de la dynamique. Cette modélisation permet de mettre à jour le cœur du mécanisme responsables de l'oscillation. Ce sont des phénomènes d'auto-organisation* temporelle ou des structures dissipatives* temporelles. Ce sont des auto-oscillations*, comportement dynamique correspondant à l'existence

d'un cycle limite* de Poincaré. Ce comportement a mis longtemps à être reconnu en chimie, où il a été en général considéré comme impossible, malgré les travaux de Bray et Lotka, jusqu'à 1970, où l'apparition douloureuse de la réaction de Belousov Zhabotinsky* et les travaux de l'école de Bruxelles (Prigogine*) sur des modèles abstraits d'auto-oscillateurs replaçant le problème dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles*, démontrèrent la possibilité d'auto-oscillations* en chimie.

SAILLANCE ET PREGNANCE

SALON DES « REFUSES ».

SAVEUR

SAVOIR

Le savoir c'est ce que l'individu maîtrise réellement du discours de la science. C'est comme la culture (La culture c'est ce qui reste quand on a tout oublié-Bernard Shaw), ce qui reste quand on a oublié tous les détails. Dans le monde contemporain où la science prolifère sous les yeux du public la distinction entre savoir et science s'impose.

On qualifie communément de savoir deux objets mentaux totalement distincts. Le premier est le savoir du botaniste, de l'entomologiste, de tous ceux qui peuvent classer de façon cohérente les objets du monde. Il implique la faculté de distinguer les objets et de concevoir pour cela des critères de plus en plus fins. Appelons le savoir *catégoriel*. Nous le connaissons sous la forme de Flores, de clés d'identification, d'organigrammes de tous genres. L'ambition de Bacon* était de dresser un catalogue, un inventaire aussi complet que possible, des objets du monde, et Linné* a rendu ce catalogue rationnel pour tous les êtres vivants. Mais il est un autre type de savoir, qui se base sur les entités observées et décrites par le premier, et qui s'attache à formuler les relations*, les liaisons de toutes sortes, quantitatives ou non, qui les unissent. Appelons le savoir *algorithmique*. Il s'exprime par des équations*, par des théories*, par des modèles*. C'est certainement dans l'élaboration du savoir catégoriel que la perception* joue le rôle le plus net. Assez curieusement les professionnels du second considèrent souvent avec condescendance, sinon mépris, les artisans du premier. Il est clair pourtant que le second ne peut exister sans le premier, et que celui-ci est inutile sans l'autre.

Le savoir entretient avec la vision* des relations privilégiées.

SCHRÖDINGER (EQUATION DE)

L'équation de Schrödinger est l'équation fondamentale de la Mécanique Quantique non relativiste. Elle exprime l'évolution de l'état* (fonction d'onde*) d'un système microphysique en l'absence d'observation.

Sa stigmatisme fondamentale est de contenir le terme imaginaire i ($i^2 = -1$). De ce fait elle n'est pas l'équation d'évolution ordinaire d'une onde pas plus que l'équation de diffusion d'un corpuscule ou d'un liquide. Ceci constitue le verrou de blocage des tentatives d'interprétation* réaliste de la Mécanique Quantique. Schrödinger lui même avait vis à vis de ce i une attitude résignée qu'il cherchait à compenser par de l'humour viennois.

Il n'en reste pas moins que l'extraordinaire accord entre les observations expérimentales et les prédictions tirées de l'équation de Schrödinger, en particulier dans les domaines de la spectroscopie atomique et moléculaire, font de cette équation l'emblème de la Mécanique Quantique. Au point que l'on a pu dire que " l'atome d'hydrogène, c'est l'équation de Schrödinger de l'atome d'hydrogène".

Dans le cas des systèmes stationnaires* l'état se représente comme le produit d'une fonction ne dépendant que de la position par une fonction oscillatoire ne dépendant que du temps. La résolution de l'équation de Schrödinger par séparation des variables se réduit alors à la résolution d'une équation différentielle dans l'espace de configuration*, que l'on dénomme couramment équation de Schrödinger. La résolution de cette équation est équivalente à la recherche des valeurs propres* de l'opérateur hamiltonien* du système, qui sont les énergies possibles (quantification*). Les états propres* associés, permettent de calculer les probabilités des valeurs des différentes observables du système.

La résolution de l'équation de Schrödinger des atomes et des molécules est l'objet de la chimie quantique*.

SCIENCE

La définition de la science et du caractère scientifique d'un discours a connu de multiples développements au cours de sa distinction progressive du mythe* et de la philosophie*. Alors que ceux ci visent la totalité du réel, la science commence par contre sitôt que

l'on convient de délimiter un problème de façon à subordonner sa solution à des constatations accessibles à tous et vérifiables par tous, en le dissociant des questions d'évaluation ou de conviction et en les distinguant de l'occultisme*. On s'efforce de chercher une délimitation en vue d'un accord possible des esprits.(Cf. Connaissance scientifique*)

Parmi bien d'autres, la science distingue cinq problématiques différentes.

L'ontologie*. Quels objets existent dans le monde ? Quelles affirmations sur ces objets sont vraies ?

L'épistémologie*. Comment les êtres humains acquièrent une connaissance des vérités concernant le monde ? Comment peuvent-ils avoir confiance dans cette connaissance* ?

La sociologie de la connaissance (Cf. Science et société*). Dans quelle mesure les vérités connues ou connaissables par les humains dans une société donnée, sont influencées (ou déterminées) par les facteurs sociaux, économiques, politiques, culturels et idéologiques ?

L'éthique individuelle. Quels types de recherches un scientifique devrait ou ne devrait pas entreprendre ?

L'éthique sociale. Quels types de recherches une société devrait encourager, subventionner ou entretenir financièrement (ou ne pas le faire) ?

SCIENCE ET IDEOLOGIE

SCIENCE ET INFORMATIQUE

SCIENCE ET KABBALÉ

A la Renaissance et au XVII^e siècle l'influence de la Kabbale*, mystique juive, se fait sentir à travers le rôle joué par les kabbalistes chrétiens. En particulier Francis Mercury van Helmont* et Christian Knorr von Rosenroth* publient une traduction latine de textes kabbalistiques « Kabbala Denudata » (1677,1684), le corpus le plus important de traductions de la Kabbale pour cette époque. Gershom Scholem, le grand historien de la mystique juive a reconnu la précision et la culture des deux traducteurs. Newton* possédait un exemplaire personnel de cet ouvrage dans sa bibliothèque.

Le sujet de ce livre étant parfaitement ésotérique, l'ouvrage n'a jamais été considéré comme un texte significatif pour la compréhension de l'émergence de la pensée moderne. Voltaire et ses amis philosophes rejetaient toute religion révélée, en particulier le

judaisme ; mais une analyse des voies créatrices par lesquelles des hommes comme van Helmont interprétaient les Ecritures au moyen des kabbalistes juifs révèle à quel point la pensée des Lumières* est redevable à l'occultisme du siècle précédent. Van Helmont voyageait beaucoup et diffusait sa kabbale partout en Europe. En particulier auprès du néoplatoniste de Cambridge Henry More* et du philosophe John Locke*. Il venait souvent à Hanovre, où il passait de longs moments avec Leibniz*. Leibniz était un humaniste à tous les sens du mot, et bien des idées qu'il a émises ont été stimulées par son amitié avec van Helmont et leurs longues conversations sur la philosophie ésotérique de la Kabbale.

C'est ce même van Helmont qui a présenté von Rosenroth à Leibniz en 1671, inaugurant une amitié entre les deux hommes. En 1688 Leibniz passa un mois chez von Rosenroth. Leibniz vouait à cet érudit une grande estime comme en témoigne sa correspondance. Les idées kabbalistiques de von Rosenroth ont influencé Leibniz dans sa conception des monades, son argumentation en faveur du libre arbitre*, sa théodicée et enfin dans sa théorie de la causalité* comme volonté.

Comme Leibniz, von Rosenroth était un tenant de la philosophie naturelle, et il participait activement aux débats scientifiques de cette période. Il correspondait, avec Henry Oldenburg de la Royal Society de Londres ainsi qu'avec le chimiste Robert Boyle* et le platonicien Henry More. Leibniz partageait avec von Rosenroth l'intérêt pour la science contemporaine de pair avec l'intérêt pour l'alchimie*, tout comme Newton d'ailleurs.

En ce qui concerne la kabbale lourianique, on peut remarquer qu'elle participe des spéculations sur l'espace et le vide qui apparaissent dans la Théologie, la Philosophie et la Science aux XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles. Ces spéculations s'inscrivent dans la tradition alchimique à travers l'hermétisme ambiant. Notons juste que Henry More, qui eut une grande influence sur Newton* et Locke*, a beaucoup étudié la kabbale lourianique, et publié sur ce sujet. Henry More et Joseph Raphson, le mathématicien ami de Newton, ont beaucoup utilisé les conceptions cabalistes, en particulier celle du tsimtsoum, dans l'élaboration de leur propre théologie de l'espace. Newton était au courant de ces idées, mais les répudiait en général, quoiqu'il ait utilisé la conception juive de maqom (place) comme expression de l'omniprésence divine.

Henri Atlan* s'est demandé si l'intérêt pour la Kabbale n'est pas venu de ce qu'elle élabore une structure linguistique* de la réalité*. Les textes kabbalistes peuvent en effet être lus comme les lieux

d'élaboration d'un formalisme abstrait (dont la structure logique interne constitue la seule justification) différent de celui des mathématiques. Ce qui les caractérise est peut être moins un contenu théologique et religieux qu'un langage formel particulier servant de grille et de moteur à une entreprise de savoir sur le monde. On comprend que Leibniz à la recherche d'une « mathesis universalis » se soit intéressé à la Kabbale. Leibniz a le premier aperçu, précédant de loin son époque, l'idée universelle d'une pensée algébrique au plus haut sens du terme. Une logique formelle s'étendant dans tous les sens, une science des formes de sens du « *quelque chose* » en général.

Les philosophes du langage et les développements innatendus de la physique au XX^e siècle ont fait apparaître les concepts scientifiques modernes comme des abstractions d'un type analogue, en ce sens que leur valeur provient beaucoup plus de leur efficacité opératoire que de leur signification métaphysique.

C'est un fait bien connu que la combinatoire* leibnizienne est largement tributaire des travaux de Raymond Lulle* restés extrêmement présents au sein du courant hermétiste* et néoplatonicien* de la Renaissance et du Baroque*. D'ailleurs les idées de Lulle sont fortement empreintes d'idées proches de la Kabbale.

SCIENCE ET MYTHE

Le mythe* est un mode de pensée particulier qui occupe une large place à certaines époques et dans certaines cultures.

Si l'on considère l'esprit scientifique comme opposé à l'esprit mythique, on peut à juste titre s'étonner de ce que la Science au XX^e siècle atteigne les sommets que l'on sait, à une époque où le Mythe joue un rôle écrasant dans la culture et dans l'Histoire. On peut voir ici à l'œuvre l'un des grands paradoxes de la culture scientifique moderne. Elle se veut rigoureuse, théoricienne et démonstrative. Mais à la regarder de près on la voit très proche des formes générales des mythologies anciennes ou des métaphysiques et des religions que la science prétend supplanter.

Le mythe resurgit au XX^e siècle sous des formes tout à fait surprenantes. A la lumière de la pensée mythique, certains traits de la pensée actuelle s'éclairent et apparaissent pour ce qu'ils sont : de vieilles traditions de pensée rehaussées d'un rafistolage scientifique afin de les rendre présentables. Il y a toujours une profonde unité dans la culture d'une époque et l'Histoire nous enseigne que les grandes époques mythiques sont aussi les grandes époques scientifiques.

Dans « La Jeunesse de la Science Grecque » Abel Rey voit la science grecque naître au milieu même du mythe et de la magie qui se donnent la main.

C'est l'esprit mythique qui a développé le besoin qu'a l'homme d'être satisfait par une réponse à ses étonnements. C'est cet esprit qui pousse chez les grecs à la rationalisation, à l'explication. Il a fallu un grand souffle mystique pour porter cette science hors du sensible et de la mesure humaine : la mystique de la démonstration et de la raison.....

On ne doit alors pas s'étonner de découvrir l'atmosphère d'ésotérisme* dans laquelle est née la Science Classique du XVIIème siècle. Kepler*, Leibniz* et Newton* sont les héritiers des astrologues* et des alchimistes* et s'intéressaient aux idées kabbalistes (Cf. Science et Kabbale*). Les conceptions de Boyle* (le pilier de la philosophie mécanique) sur la structure corpusculaire de la matière doivent tout autant à son œuvre expérimentale qu'à sa familiarité avec les traditions pneumatiques véhiculées par la Quintessence* des distillateurs alchimistes.

Mais plus encore que l'ésotérisme, c'est le souci théologique qui domine la pensée du XVIIème siècle. Jamais avant, ni après, science, philosophie et théologie ne sembleront une seule et même pensée. Galilée*, Descartes*, Leibniz*, Newton*, Hobbes*, Vico* ne font pas partie du clergé et n'ont pas une formation supérieure de théologie, mais ils n'ont pas cessé de traiter longuement de problèmes théologiques. Une sécularisation de la théologie qui va à la fois créer la Science et déboucher sur l'Athéisme au XVIIIème siècle. Il en découlera que le XVIIIème siècle, le Siècle des Lumières, et le XIXème siècle, siècle du Réalisme, pourront être considérés comme des siècles de « démythologisation de la culture ».

Le XXème siècle par contre est un siècle de « remythologisation ». Le passage du réalisme du XIXème siècle au modernisme a comme composante essentielle la tendance à sortir des cadres socio-historiques et spatio-temporels. La mythologie, de par son caractère symbolique, s'avère un langage naturel et commode pour traduire cette évasion hors du « réel ». Evasion provoquée par la prise de conscience de la crise de la culture bourgeoise comme crise de la civilisation toute entière.

De Nietzsche* à Freud* et Jung*, de Lévi-Brühl à Cassirer*, Eliade*, Dumézil et Lévi-Strauss*, la vision de l'homme est avant tout mythologique.

Rien d'étonnant alors à ce que la Science du XXème siècle soit une pensée mythique. Mais le révéler sans en compromettre le message est une entreprise délicate.

SCIENCE ET PHILOSOPHIE (Influence de la science sur la philosophie)

SCIENCE ET POESIE

SCIENCE ET PSEUDOSCIENCE

SCIENCE ET RELIGION

Toute religion comporte une part de philosophie naturelle* doublée d'un système métaphysique*. Elle se présente comme un discours sur la nature et l'homme comportant une vision du monde sous tendue par l'existence d'une Ame, la présence de Dieu*. Ce discours qui a souvent précédé celui de la science entretient avec lui des rapports historiques et sociaux multiples. La religion élabore une pensée mythique qu'elle cherche à transformer en un système logiquement organisé. C'est cette organisation qui offre un champ d'interaction avec la science sur de nombreux thèmes communs. Science et religion se prononcent sur l'origine du monde, la création de la vie, l'organisation de l'univers, les différents types de causalité*, le déterminisme* et le destin, le libre arbitre*, le sens de l'évolution*. Mais ce qui les différencie profondément, c'est la méthode suivie pour établir les connaissances, croyance révélée dans le cas de la religion, construction rationnelle à partir des faits d'expérience dans le cas de la science.

Historiquement la science moderne est née au cœur d'une culture profondément religieuse et l'on ne peut que souligner ce que l'imaginaire scientifique doit à la théologie chrétienne. Ceci a été admirablement décrit par Amos Funkenstein dans un livre éblouissant : « *Théologie et imagination scientifique du Moyen-âge au XVII^e siècle* » où il montre que la science moderne est née d'une sécularisation de la théologie (Cf. Modernité*-Origines de la). L'effondrement de la scholastique professionnelle et son appropriation par les penseurs ordinaires. Le livre est divisé selon les attributs scholastiques de Dieu : omniprésence, omnipotence, providence et connaissance divine. Funkenstein montre comment les catégories de la scholastique nourrissent le discours qui s'y oppose. La naissance de la

science doit aussi beaucoup au développement d'une institution religieuse particulière les Universités médiévales.

Il ne faut donc pas sous estimer le rôle qu'à certaines époques historiques la théologie* a pu jouer dans la constitution de la science. C'est ainsi qu'au XVI^e et XVII^e siècles en Europe la théologie a été l'objet de préoccupations de grands savants qui n'étaient pas des théologiens professionnels, Galilée* et Descartes*, Newton* et Leibniz*. C'est à partir de concepts théologiques que ces créateurs de la science moderne élaborèrent certaines conceptions centrales de leur vision du monde (Cf. Imagination scientifique*). L'idée de l'omniprésence de Dieu préfigure les concepts physiques d'espace homogène et absolu ou même d'éther. Celle de sa toute puissance a rendu possible l'idée des lois de la nature. Au XVII^e siècle les préoccupations théologiques se formulaient en termes de science profane tandis que les enjeux scientifiques s'exprimaient en termes théologiques. Ce fut la philosophie des Lumières qui libéra la science de ses supports théologiques, et en particulier Kant* dans son effort pour libérer la métaphysique et la science de leur fardeau théologique. Bien des philosophes des Lumières ont partagé le dédain kantien de la théologie. A la différence de celle de Kant, la position de certains d'entre eux était activement anti religieuse, sinon athée.

Dans la culture judéo-chrétienne, Dieu est le créateur d'un monde extérieur, ce qui lui confère une objectivité* particulière. Un Dieu raisonnable , Créateur d'un univers rationnel, dont l'homme peut, par son intelligence découvrir la structure et les limites.

Avec le temps, la physique de Newton est apparue comme le modèle d'une œuvre vraiment scientifique, détachée des spéculations métaphysiques ou religieuses. Mais en fait Newton s'appuyait sur des convictions chrétiennes; il rattachait l'ordre du monde à l'intelligence du Créateur. La deuxième édition des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* est explicite: « *Cet admirable arrangement du soleil, des planètes et des comètes ne peut être que l'ouvrage d'un Etre tout-puissant et intelligent. (...) Cet être infini gouverne tout, non pas comme l'âme du monde, mais comme le Seigneur de toutes choses. (...) Il est présent partout, non seulement virtuellement, mais substantiellement.* »

C'est le lieu ici de rappeler le rôle joué par l'alchimie* dans l'activité intellectuelle de Newton et l'intérêt porté par Leibniz* à la Kabbale* juive (Cf. Science et Kabbale*).

Remarquons alors que science et religion butent sur les mêmes problématiques quand il s'agit de définir leur objet. Ainsi Maimonide* expose des problèmes de théologie négative* en affirmant : « *Sache que*

les vrais attributs de Dieu sont ceux où l'attribution se fait au moyen de négations, ce qui ne nécessite aucune expression impropre, ni ne donne lieu en aucune façon à attribuer à Dieu une imperfection quelconque.... Nous ne saisissons de lui autre chose, si ce n'est qu'il est, mais non pas ce qu'il est. ». Une quoddité au lieu d'une quiddité. La science n'a pas un autre discours vis-à-vis de l'éther ou de l'électron. Qu'est ce qu'un électron, si ce n'est ce qu'il n'est pas ou ce qu'il manifeste ?

Résumons les principales attitudes adoptées aujourd'hui par les croyants face à la science : d'abord, le concordisme, c'est-à-dire l'idée que la science bien comprise mène à la religion. Deuxièmement, la doctrine, opposée à la première, selon laquelle il existe différents ordres de connaissance, l'un réservé à la science, l'autre à la théologie* (avec parfois la philosophie* entre les deux). Troisièmement, la thèse, réactualisée récemment par le paléontologue Steven Jay Gould affirmant que la science et la religion ne peuvent pas entrer en conflit parce que l'une s'occupe de jugements de fait, l'autre de jugements de valeur.

L'idée selon laquelle il existe une sorte de convergence entre science et religion est ancienne mais cette approche, après avoir été plus ou moins mise de côté pendant des années, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt. Ses partisans soutiennent que la science contemporaine elle-même offre de bons arguments en faveur de l'existence d'une transcendance* ; contrairement à la science classique, matérialiste, du 18e siècle, la mécanique quantique*, le théorème de Gödel*, le Big Bang*, et parfois la théorie du chaos*, nous offrent une image réenchantée du monde, indiquent les "limites" de la science et suggèrent un au-delà. La prolifération des non-observables* dans la physique contemporaine et la non satisfaction de réponses aux questions fondamentales : qu'est ce que la matière ?, qu'est ce que la vie ?, qu'est ce que l'esprit ?, qu'est ce que le bien et le mal ?, comment s'est formé l'univers ?, laissent le terrain libre aux discours métaphysiques des religions. Nos pouvoirs explicatifs se heurtent à des barrières conceptuelles laissant soupçonner bien des actions dans l'univers qui échappent à notre entendement et nous sommes étonnés de toutes les perfections du monde qui s'offrent à nous. Un exemple typique de ce genre d'attitude est le "principe anthropique" : des physiciens ont calculé que, si certaines constantes physiques avaient été très légèrement différentes de ce qu'elles sont, l'univers aurait été radicalement différent de ce qu'il est et, en particulier, que la vie et l'homme auraient été impossibles. Il y a donc là quelque chose que nous ne comprenons pas : l'Univers semble avoir été fait de façon très précise afin que nous puissions en faire partie. En fait, il s'agit d'une

nouvelle version du dessein intelligent*, à savoir que l'univers semble avoir été fait en fonction d'une certaine finalité* et que cette finalité elle-même témoigne de l'existence d'un Grand Architecte. Les tentatives pour instaurer une image d'unité se traduisant dans une organisation harmonieuse de l'univers présentent en filigrane des tentations de donner une âme créatrice au monde.

On peut ainsi penser que les données de la connaissance scientifique actuelle, notamment en cosmologie* et en biologie*, conduisent à affirmer l'existence de Dieu. La question de l'existence de Dieu ne relèverait donc pas, contrairement à ce qu'affirme la philosophie moderne depuis au moins Kant*, de la croyance, mais de la raison. La foi ne serait donc pas un saut dans l'absurde, mais tout au contraire un assentiment de l'intelligence, comme l'affirme la majorité des croyants.

On a pu voir dans l'œuvre du jésuite, savant géologue et paléontologue, Pierre Teilhard de Chardin une tentative de concilier la foi catholique et la science, de reconstruire la doctrine chrétienne dans la perspective de la science et de reconstruire la science dans la perspective de la foi. Doublant l'évolution biologique d'une évolution morale il croit en une convergence universelle de l'univers de l'esprit, en une communication des consciences où s'affirme l'existence d'un plan divin. La théorie de l'évolution* de Charles Darwin*, la géologie de Vernadsky* et la théodicée* chrétienne sont unifiées par Teilhard de Chardin* en une approche holiste* du "phénomène humain" qu'il conçoit comme une étape de l'évolution menant au déploiement de la noosphère*, une pellicule de pensée enveloppant la Terre, formée des communications humaines, laquelle prépare l'avènement de la figure dite du "Christ Cosmique". Le « point Oméga » est conçu comme le pôle de convergence de l'évolution. Le "Christ Cosmique" manifeste l'avènement d'une ère d'harmonisation des consciences. Mais cette œuvre a été publiée d'une manière posthume sans l'agrément du Vatican.

De nombreuses initiatives, instances, conférences ou rencontres ont cherché dans les dernières décennies à établir un dialogue entre la science et la spiritualité religieuse, ne fût-ce qu'au titre de l'information mutuelle. L'intérêt des autorités religieuses pour les progrès de la science est évident dans l'existence de l'Académie Pontificale des Sciences au Vatican ou dans l'organisation de rencontres entre le Dalai Lama, des moines bouddhistes et des scientifiques. L'intérêt pour la physique quantique et les corrélations mystérieuses qu'elle présente a suscité de nombreux débats en particulier avec les tenants de spiritualités orientales. Le fameux Colloque de Cordoue (1979) en est

le prototype exemplaire. Il a ouvert une brèche spiritualiste dans l'interprétation* de la mécanique quantique.

Que la science et la foi puissent coexister chez de nombreux scientifiques contemporains, sans qu'il soit toujours facile de délimiter les territoires, peut être illustré sur de nombreux exemples.

Ainsi le spécialiste russe de la théorie quantique des champs*, Sergueï Khorujii, héritier des grands représentants de la philosophie religieuse russe, Pavel Florenski* et Andreï Losev*, dont l'intérêt pour la science était avéré, se manifeste au premier plan de la théologie orthodoxe contemporaine par ses études sur l'héséchyasme* byzantin.

Ména'hém Mendel Schneerson, le Rabbi de Loubavitch, le dernier des grands rabbins leaders d'un mouvement hassidique essentiel du judaïsme contemporain, a étudié la physique et les mathématiques à Berlin et à la Sorbonne à Paris.

Le rabbin Joseph Dov Soloveitchik, la grande figure du judaïsme américain, a étudié la philosophie à Berlin, et soutenu une thèse sur le philosophe juif Herman Cohen*, le fondateur du néo-kantisme* à Marburg..

Le mathématicien allemand Georg Kantor*, créateur de la théorie des ensembles* était profondément croyant (luthérien) et faisait participer l'idée de Dieu à ses considérations sur l'infini*. Les discussions sur l'infini au cœur de la crise des fondements des mathématiques* sont la source d'attitudes spirituelles. Les pères fondateurs de l'école mathématique de Moscou, Dmitri Egorov (1869-1931) et Nikolai Luzin (1863-1950), ainsi que le mathématicien, philosophe, théologien et prêtre orthodoxe Pavel Florensky* (1882-1937) en sont l'exemple. Trois personnalités passionnées et énigmatiques, chez qui on ne peut séparer la dévotion aux mathématiques de la vie intérieure spirituelle, religieuse et mystique. . Il y'a un lien étroit entre la Glorification du nom* et l'activité mathématique de Egorov, Luzin et leurs proches L'idée que « nommer » est un acte créatif a une longue histoire dans la pensée religieuse et mythologique. Une connivence linguistique existait entre les dissidents religieux russes qui soulignaient l'importance de nommer Jésus et Dieu et les mathématiciens moscovites qui baptisaient de nouveaux ensembles. Florensky pensait que la religion et les mathématiques allaient dans la même direction.

L'attitude religieuse traditionnelle et pourrait-on dire, orthodoxe, rejette, souvent avec fermeté, l'idée d'une concordance entre science et foi et s'appuie plutôt sur l'idée que la théologie ou la réflexion religieuse nous donne accès à des connaissances d'un autre ordre que celles accessibles à la science. La religion donne des

explications que la science ne fournit pas. En particulier dans le domaine des sentiments et de la vie intérieure.

En 1998, une encyclique vaticane, « Fides et ratio », insiste sur l'importance du fondement dans le développement de la pensée, par rapport à la simple étude des phénomènes, et que ce fondement repose sur la métaphysique. La réalité* et la vérité* transcendent le factuel et l'empirique, et l'homme a la capacité de connaître cette dimension transcendante et métaphysique d'une manière véridique et certaine. Il faut que la réflexion spéculative atteigne la substance spirituelle et les fondements sur lesquels elle repose.

Une position consiste à séparer totalement les deux domaines : la science s'occupe des jugements de fait et la religion s'occupe d'autres jugements, par exemple les jugements de valeur, le sens de la vie etc. Cette séparation des domaines, séparation de l'oratoire et du laboratoire, est défendue par certains intellectuels et certains scientifiques, par exemple par le paléontologue S. J. Gould* qui se déclare "agnostique*", mais désire défendre la théorie de l'évolution* contre les attaques créationnistes* tout en permettant à la religion de garder une certaine place dans la culture. Une façon de conserver la valeur de la religion à côté de la valeur de la science en ne mélangeant pas les genres. Une attitude de repli devant le recul de l'image morale de la science et de la technologie provoqué par les excès et les débordements de l'histoire au XX^e siècle. Un refuge devant l'effondrement de nombreuses idéologies.

Il ne faut pas perdre de vue que dans la confrontation entre la science, la religion et les idéologies*, ce n'est pas tant la comparaison des connaissances qui est en jeu qu'un conflit de pouvoir nécessitant des repères identitaires.

SCIENCE ET SOCIETE

Depuis Marx on a pris l'habitude de souligner la corrélation forte qui existe entre la science et la structure socio-économique de la société où elle se manifeste, ainsi que des idéologies* correspondantes. Il existe même une histoire sociale de la science aux perspectives changeantes.

Si l'influence de la science sur la société et les idéologies est bien établie et en un sens une banalité, sans parler du scientisme*, l'influence de la société sur la science reste un sujet qui mérite d'être documenté.

Ainsi la perspective* à la Renaissance n'est pas seulement un changement de regard sur la nature mais un changement de regard sur la société toute entière qui sort progressivement du féodalisme.

On a cherché à voir des rapports entre la Mécanique Quantique et l'idéologie intellectuelle de la République de Weimar. B. Forman en 1971 fait paraître un article célèbre : « *Weimar culture, causality and quantum theory. 1918-1927: Adaptation by german physicists and mathematicians to an hostile intellectual environment.* Il y soutient la grande influence qu'avait à cette époque le livre d'Ostwald Spengler* : « *Der Untergang des Abendlandes* », (Le déclin de l'occident). Il montre qu'au lendemain de la défaite de l'Allemagne, la tendance intellectuelle dominante dans le monde académique de la République de Weimar était une philosophie de la vie néo-romantique et existentialiste, caractérisée par un antagonisme envers la rationalité analytique en général, et envers les sciences exactes et leurs implications technologiques en particulier. Implicitement ou explicitement le scientifique était le bouc émissaire des exhortations à un renouveau spirituel, alors que le concept ou simplement le mot causalité symbolisait tout ce qui paraissait odieux dans l'entreprise scientifique. Un large mouvement se dessinait parmi les physiciens pour se dispenser de la causalité en physique, et par là de la causalité en théorie quantique. Réaction des physiciens à un environnement hostile.

Dans les années 80 on a considéré les nouveaux rapports entre l'ordre* et le chaos* comme une composante fondamentale de la nouvelle période technologique et culturelle dite post-moderne*. Ce post moderne là est en fait un post-structuralisme* dont les effets se font sentir à tous les niveaux de la culture, dans sa vision et sa représentation du monde. La bannière et le diagnostic de cette situation semblent se trouver dans J.F. Lyotard " *La condition post moderne*" (1979), l'année même de „*La nouvelle alliance*“ de I. Prigogine* et de I. Stengers*, considéré comme une synthèse post moderniste très largement diffusée. Il ya là une influence de la science sur la culture mais aussi indéniablement en retour une action de la culture sur la science. Un virage important dans la science du chaos* se produisit lorsque les systèmes complexes* furent conceptualisés comme des systèmes riches en information* plutôt que des systèmes pauvres en ordre*. Ceci provoqua une augmentation de l'attention prêtée aux phénomènes stochastiques* dans les systèmes complexes. On a même pu écrire que la théorie du chaos (chaologie!?) était influencée par la culture environnante. L'étude du „désordre“ exigeait en effet non seulement de nouveaux concepts, mais l'apparition d'une sensibilité nouvelle. Il s'est produit un net changement dans le style et

dans le choix des objets à étudier. Un changement qui ne concernait pas seulement les techniques mathématiques, mais exprimait une mutation qu'on peut appeler culturelle ou philosophique. Une transformation du regard, une transformation de la sensibilité. L'étude de la théorie du chaos se trouva influencée par la culture environnante, une prise de conscience émergente du rôle constructif du désordre, de la non linéarité* et du bruit* dans les systèmes complexes.

On a pu remarquer que considérer la science sous l'influence de la culture*, de l'idéologie*, du mythe* et de la religion était une manière de déconsidérer la science en combattant le scientisme*.

SCIENCE FICTION

Le mot "science" n'apparaît qu'en 1643 et le premier cours de mathématiques ne date que de 1644. Le XVIIème siècle est celui, d'une nouvelle "écriture" de la science, de l'invention d'un nouveau vocabulaire, spécifique à la science, en particulier aux mathématiques. Ainsi, le mot "imaginaire" est inventé par Descartes* qui dans le *Discours de la méthode* (1637), l'oppose à "réel". Cette "création" personnelle de Descartes fait écho aux nouveaux procédés de "mise en scène" qui caractérisent le Théâtre Baroque : jouer, *c'est représenter quelque chose qui n'existe pas* comme s'il s'agissait d'une réalité.

Dans les *Discorsi Galilée** met en scène quatre personnes discutant de science: l'auteur lui-même, *Simplicio* (qui représente Galilée lorsqu'il professait de façon dogmatique, la physique aristotélicienne), Sagredo et Salviati. Galilée, en fait, y introduit le "point de vue subjectif" : à propos de la chute des corps, Sagredo utilise une figure, un dessin, qui est une représentation nécessairement entachée d'imaginaire ("*une idée qui me vient juste à l'esprit pour éclairer le propos...*", dit-il).

Le lien s'impose avec *L'autre Monde ou les Etats et Empire de la Lune* (1657) de Cyrano de Bergerac, qui, lui, tourne en dérision le vieux langage scientifique aristotélicien qui rend "comique" le moment, pourtant scientifique, où le narrateur se voit "*choir les pieds en haut sans avoir culbuté en aucune façon*", lorsqu'il approche de la Lune.

L'œuvre de Johannes Kepler, le *Mysterium cosmographicum* (1596) et le *Somnium* (1634), sont des exemples intéressants des liens étroits existant entre fiction et méthode scientifique.

Si la science contemporaine fourmille d'exemples de fictions scientifiques, la science fiction est devenue un genre artistique,

littéraire ou cinématographique, dont le « merveilleux scientifique » de Jules Verne est un prédécesseur.

SCIENCES COGNITIVES (Cf. Cognitives –Sciences)

SCIENCES HUMAINES

SCIENTISME

Ensemble de convictions idéologiques* affirmant le rôle fondamental de la science* comme source de la connaissance et du jugement sur le monde. Souvent les scientifiques considèrent comme sciences de base, la physique et les mathématiques, et considèrent que les autres sciences devraient être bâties sur ce modèle. Les scientifiques placent la science dans une position principale dans la vie des idées et dans la culture de la société.

Le terme scientisme a souvent une connotation négative signifiant soit l'emploi non adapté de méthodes scientifiques hors de la sphère des sciences, soit la conviction que les méthodes des sciences de la nature s'avèrent les seules possibles dans toutes les questions philosophiques et humaines. Le scientisme dénie aux sciences humaines* leur caractère scientifique. Un des slogans classique du scientisme peut se voir dans la phrase du grand physicien E. Rutherford* : « *Toutes les sciences se divisent en la physique et les collections de timbre* ».

De F. Bacon* et son utopie de « *La nouvelle Atlantide* » jusqu'au marxisme* et le néo-positivisme* bien des vues scientistes se sont exprimées.

SCOLASTIQUE

Ensemble d'une activité philosophique médiévale qui malgré son caractère théologique développe une attitude rationnelle autour de problèmes formels et logiques, souvent inspirés de l'opposition entre platonisme et aristotélisme*. A donné lieu à des débats célèbres comme la querelle des universaux* ou le nominalisme*. A développé de nombreux débats autour de l'harmonie de la raison et de la foi.

La scolastique est un mouvement philosophique et théologique qui s'efforçait d'utiliser la raison naturelle, en particulier la philosophie et la science d'Aristote, pour comprendre la dimension surnaturelle de la révélation chrétienne ; enseignée dans les écoles

chrétiennes et les universités européennes du XIe au XVe siècle, son but ultime était d'intégrer en un système ordonné la sagesse naturelle de l'antiquité gréco-romaine et la foi chrétienne.

Au XIVe siècle, la scolastique s'enlise dans le formalisme : ses adeptes se montrent plus attentifs à la forme de leur discours qu'à son contenu, dont l'importance est rejetée loin en arrière-plan ; c'est cette façon d'agir que l'on désigne quand, à partir de la Renaissance, on utilise le mot scolastique avec un sens péjoratif.

En fait le mouvement scolastique touche toutes les grandes religions monothéistes et Maïmonide*, Averroés* ou Thomas d'Aquin* en sont les meilleurs représentants.

SECONDE QUANTIFICATION (Cf. QUANTIFICATION (SECONDE))

SEMANTIQUE

Discipline qui étudie le rapport des signes* aux objets qu'ils signifient ou dénotent. C'est l'étude de la signification* et du sens*

SEMANTIQUE D'UNE THEORIE

Partie d'une théorie scientifique qui donne au moyen de règles de correspondance ou de définitions opératoires une interprétation*aux termes théoriques composant ses énoncés. C'est l'interprétation* d'un système formel.*.

SEMI-CLASSIQUE (APPROXIMATION)

Etude de l'interaction d'un champ classique avec un objet quantique.

C'est le cas par exemple lorsque l'on fait agir la lumière comme champ électromagnétique sur un atome ou une molécule. On obtient ainsi une image où l'objet quantique passe d'un état à un autre par absorption d'énergie du champ. Le calcul ne décrit pas la transition mais fournit la probabilité de transition d'un état vers un autre. Image

satisfaisante de l'excitation d'un objet quantique par une source extérieure d'énergie.

L'approximation semi-classique est largement utilisée. Un exemple de sa généralité apparaît dans le cas où l'on considère l'univers tout entier comme un objet quantique qui absorbe de l'énergie à partir de l'expansion de l'espace temps pour passer du vide quantique à un état excité (Vides (Histoires de))

SEMICONDUCTEUR

SEMIOPHYSIQUE

La sémiophysique ou « *physique du sens* » est un programme de recherches morphodynamiques, initié par René Thom, à la suite de sa théorie des catastrophes*. Il s'agit d'unifier deux ontologies* catégoriquement séparées depuis la rupture galiléenne, celle de l'objectivité physique et celle de la forme* et du sens*. Le sens est inhérent à l'organisation phénoménale du monde sensible en formes*, choses*, qualités*, processus*, événements qualitativement structurés et organisés, perceptivement appréhendables et linguistiquement descriptibles. La thèse de Thom est que « l'intelligibilité est une propriété des phénomènes (interprétés en tant que Gestalten*) avant toute conceptualisation au sens strict.

Il décrit l'émergence* des formes comme un processus de passage du niveau fin microscopique au niveau macroscopique qualitatif, où se manifeste l'invariance qui marque l'autonomie du système. Un qualitatifisme aristotélien !

Il cherche à comprendre la façon dont la perception se trouve corrélée à cette physique qualitative. Il y a un niveau de réalité morphologique qui repose sur des discontinuités qualitatives. Thom n'a eu de cesse d'affirmer que les discontinuités se propagent de l'objet au sujet et qu'elles constituent par leur « saillance » l'expérience perceptive première, ce que confirment les sciences actuelles de la perception*.

Selon Thom « Ne peut-on admettre....que les facteurs d'invariance phénoménologiques qui créent chez l'observateur le sentiment de la signification proviennent de propriétés réelles des objets du monde extérieur, et manifestent la présence objective d'entités formelles liées à ces objets et dont on dira qu'elles sont porteuses de signification ? ».

Le point de vue morphodynamique, marque un retour au qualitatifisme* d'Aristote. Il est au fondement de la psychanalyse élaborée par Freud* (introduit à la pensée aristotélicienne lorsqu'il était élève de Franz Brentano*). Il est celui de la théorie des catastrophes* et de toute la dynamique qualitative* contemporaine.

SEMIOTIQUE

Science des signes* et des systèmes* de signes (en grec semeion : signe).

Tout comme la linguistique structurale*, utilise en fait une définition du signe comme élément d'un système* où le signe ne prend sa signification* définitive que par ses rapports avec les autres signes.

La sémiotique a été fondée par les travaux du philosophe américain Ch. Peirce* (1839-1914) et du philologue et anthropologue suisse F. de Saussure* (1857-1913) qui ont étudié la nature du signe et du langage, donnant naissance à l'idée d'une discipline unique étudiant tous les systèmes de signes.

La sémiotique contemporaine s'est constituée s'est constituée en science indépendante dans les années 50 aux frontières de la linguistique structurale*, de la cybernétique* et de la théorie de l'information*. Dans l'esprit de toutes ces théories elle postule qu'il existe des lois générales de la signification* et de la communication*, indépendantes du contenu.

La sémiotique s'organise selon trois niveaux :

La syntaxe* qui traite de l'organisation des signes et distingue deux grandes espèces d'organisation, les syntagmes* et les paradigmes*.

La sémantique* qui interprète la contenu signifié* d'une suite de signes et analyse l'émergence du sens*.

La pragmatique* qui décrit les relations entre les systèmes de signes et le récepteur, lorsque celui ci agit en utilisant la signification* des signes.

En fait la sémiotique est la théorie des situations où se manifeste une triade fondamentale :

Signifiant* (signal*, signe*) -- signifié* (sens*) --- action du récepteur

Etudiant tous les moyens de communication* à l'aide de signes*, la sémiotique considère la communication entre les êtres vivants, la communication entre les hommes et les relations dans le système « homme-machine ».

Les objets qui peuvent être considérés comme des langages* relèvent de la sémiotique. Parmi les langages on distingue :

Les langues naturelles, c.a.d. les langues historiquement constituées par les collectifs nationaux.

Les langues artificielles, langues de commande et de programmation dans le système homme-machine.

Les métalangages, langues utilisées pour la description des langues naturelles et des langues artificielles ; on y rattache les langages scientifiques artificiellement créés .

Les langages secondaires, ce sont les différents langages de la culture, qui apparaissent sur la base des langues naturelles primaires (systèmes symboliques du mythe et du rituel, interdictions et commandements socio-éthiques, langages artistiques....). Cette désignation est relativement conventionnelle, et ne fait que souligner le rôle primordial joué par les langues naturelles en tant qu'étalon dans toutes les études sémiotiques.

SENS

Le mot sens utilisé souvent indifféremment à la place de celui de signification* devrait être réservé à la caractérisation d'un ensemble ou d'un système de signes*, dont il désigne l'identité* telle qu'elle se dégage d'une interprétation*. La problématique du sens, est très voisine de celle de la forme*. Tout comme la forme, le sens, en accord avec la connotation de direction donnée par le mot, émerge par suite d'une dissymétrie, d'une mise en ordre des signes.

Frege*a clairement distingué le sens de la dénotation*.

SENS COMMUN (PHYSIQUE NAIVE)

Les développements récents de la psychologie (théorie de la gestalt*, psychologie cognitive) et de l'intelligence artificielle (robotique) ont focalisé l'intérêt sur l'étude de la structure du sens commun, c.a.d. du comportement naturel en l'absence de tout appareil théorique. W. Köhler, un des fondateurs de la psychologie de la gestalt, déclarait qu'il n'y a qu'un seul point de départ pour la psychologie, tout comme pour les autres sciences : le monde tel que nous le trouvons de façon naïve et non critique. Il considérait même la

physique de l'homme naïf comme bien plus importante d'un point de vue purement biologique que la physique théorique.

Cet intérêt pour la perception pure envahit toute la philosophie au XX^e siècle, de Mach* et de la Gestalt* à la phénoménologie* (Husserl*, Merleau Ponty). Consciemment ou inconsciemment, la physique théorique entretient des passerelles entre ses propres discours et le discours phénoménologique. De la relativité einsteinienne aux théories bayésiennes de la perception du réel, une mathématisation du bon sens est à l'œuvre. Tout en confirmant le jugement de Laplace, la science sait néanmoins qu'il faut souvent se méfier du sens commun, comme l'ont si bien montré Kahneman et Tversky en ce qui concerne le jugement en situation d'incertitude

Smith et Casati ont tenté d'établir certaines des caractéristiques de la physique naïve :

le monde du sens commun est avant tout un monde d'objets

c'est un monde où nous savons distinguer ce qui est « normal » et ce qui à un certain degré est « anormal »

les gestaltistes comme les phénoménologues ont toujours insisté sur l'optimalité des objets perçus (économie de pensée de Mach)

le sens commun considère les objets et les évènements/processus comme deux catégories très différentes même si elles interagissent

le monde est organisé d'une manière causale

nous percevons le vide entre les choses et le considérons comme un milieu où se déplacent les objets

La physique quantique sous son appareil mathématique satisfait peu ou prou à ces traits de caractère de la physique naïve. Elle est atomiste, elle sait définir le normal et l'anormal, elle se fonde sur des principes d'optimalité, elle oppose en les contraignant à fusionner les images corpusculaires et les images ondulatoires, elle garantit la causalité et construit son vide.

C'est en ce sens que la mécanique quantique participe au mouvement dit de « naturalisation de la phénoménologie ».

SIGNAL

Manifestation clairement définie dans l'espace et le temps, utilisable pour la transmission d'un message* dans une procédure de communication*. C'est le support physique du signe* appelé stimulus par les sémioticiens.

SIGNAL (TRAITEMENT DU)

SIGNE (Cf. Linguistique structurale*)

Signal* doté d'une signification*. Système d'objets concret ou abstrait en correspondance avec une certain signification*. Le signe* est l'élément d'un message*. Le signe est un substitut (signifiant*) d'une chose (signifié*) C'est dans cette correspondance entre un signifiant* et un signifié* que chaque terme acquiert une part de son statut de constituant du signe. Cette correspondance peut avoir un caractère varié (dénotative, symbolique, abstraite, métaphorique.....). Elle est en général conventionnelle, ce qui fait parler du caractère arbitraire des signes. Elle prend son plein intérêt lorsqu'elle s'avère un isomorphisme*, c.a.d. lorsque les opérations sur les signes correspondent aux opérations sur le contenu sémantique, facilitant éventuellement ces dernières.

A la conception de Saussure* de l'arbitraire du signe linguistique s'opposent les conceptions de Goethe* et de Humboldt sur le caractère énergétique du mot*.

On a l'habitude de définir l'objet non linguistique qui correspond à la chose évoquée par le signifié, comme le référent*.

On distingue selon le rapport plus ou moins arbitraire entre le signifiant* et le signifié* (ou le référent*) divers types de signes, qui réalisent divers types de représentation :

Le signal*, signe sans signification qui agit comme stimulus.

Le symptôme, où il existe un lien naturel entre le signifiant et le signifié.

L'icône* où il y a similitude topologique entre le signifiant et le signifié.

L'indice* où le signifiant et le signifié entretiennent des rapports de continuité existentielle ou causale (la fumée signifie le feu) ;

Le symbole* où le rapport signifiant signifié est purement conventionnel.

Le nom, signe qui représente une classe d'objets.

Le mot signe est souvent utilisé dans le langage courant pour désigner un signifiant*.

Un signe n'est pas un simple code. Il est un élément de structuration et de lecture de l'univers : non seulement nous percevons à travers les signes, mais les signes donnent existence aux choses.

Les signes ne sont pas des événements isolés, il sont inclus dans des systèmes*, et la structure du signe est en grande partie héritée du

système auquel il appartient. Les signes n'ont pas un sens donné d'avance de façon platonicienne, leur signification est relationnelle*, car les signes sont toujours interprétés dans des contextes particuliers. Le signe n'est pas défini à priori, mais forme par son rôle dans le fonctionnement d'un système, sous l'effet de rétroactions diverses. On retrouve là l'idée sur l'apparition dynamique des formes* et sur l'auto-organisation*. Et surtout celle de fonctionnement autonome* du langage*. Le signe n'y est pas une entité sémiotique fixe donnée d'avance mais un phénomène émergent. Les signes sont construits par le locuteur et dans une certaine mesure par le récepteur. Le signe n'est pas un atome dans un système atomistique.

SIGNIFIANT

L'aspect signal* d'un signe*.

SIGNIFICATION

Correspondance qu'un observateur établit entre un signifiant* et un référent*. L'acte même d'apparition du signifié*. Le résultat de l'interprétation* du signe.

SIGNIFIE

La part de signification d'un signe*. Elle n'existe que grâce à un code* qui renvoie le signifiant* à un référent*.

SIMILARITE

SIMPLICITE

SIMULACRE

Le simulacre c'est feindre de faire ce que l'on ne fait pas. Le simulacre remplace la réalité par une réalité différente qui semble se comporter de la même manière. Un simulacre d'exécution est un comportement semblable à celui d'une exécution mais ne représente pas une exécution réelle. Alors que la représentation* d'une exécution par l'image relève de la simulation*.

Le simulacre met en jeu la mimésis au sens de l'imitation du comportement dans son déroulement ou ses accomplissements. Le simulacre mobilise l'imaginaire* et l'analogie*. Un tissu est un simulacre de toile d'araignée, tout comme une simulation de Monte Carlo* est un simulacre du phénomène réel représenté par une équation. L'astronomie de Ptolémée* est un simulacre du mouvement des planètes. Un diagramme de Feynman* est un simulacre de l'interaction entre particules. Le simulacre est un « Comme si* » parfait. La cybernétique* est le règne du simulacre.

SIMULACRE DE MONTE CARLO

Méthode numérique de modélisation statistique utilisant une interprétation probabiliste de la grandeur que l'on cherche à calculer pour un système qui n'a pas forcément un caractère aléatoire. La détermination du nombre π par l'étude statistique des jets de paquets d'épingles sur un cercle tracé dans un plan fait partie de la préhistoire de la méthode (Buffon, 1717).

On construit un modèle aléatoire fictif, n'ayant en général pas de relation avec l'objet que l'on modélise, mais permettant d'obtenir par une expérience statistique une caractéristique de l'objet assimilée à la valeur moyenne ou à tout autre caractéristique statistique du phénomène aléatoire fictif.

L'engendrement sur ordinateur de cet objet mathématique aléatoire constitue au sens propre une simulation stochastique (simulation de Monte-Carlo). La méthode de Monte-Carlo consiste à étudier expérimentalement cet objet aléatoire pour en déterminer certaines propriétés statistiques égales numériquement à certaines propriétés de l'objet à modéliser. C'est en ce sens que ce qui commence par une simple simulation* devient un simulacre stochastique.

La méthode de Monte-Carlo est devenue un élément essentiel de toutes les réalisations scientifiques ou techniques des dernières décennies. Elle permet d'obtenir rapidement des informations sur un objet technologique dont la description détaillée n'est pas disponible. Par son utilisation du simulacre* cette méthode est tout à fait représentative de l'esprit de la cybernétique*.

SIMULATION

« Dissimuler est feindre de ne pas avoir ce qu'on a. Simuler est feindre d'avoir ce qu'on a pas. L'un renvoie à une présence, l'autre à une absence. » (J. Baudrillard).

La simulation laisse croire à une présence au moyen de signes qui font illusion. Simuler une maladie, simuler la folie, c'est en produire les symptômes dans une situation où les phénomènes réels sont absents. L'engendrement sur ordinateur des événements mathématiques correspondant à des événements ou des formules constitue une simulation des phénomènes physique réels que ces expressions mathématiques représentent. On reproduit par ordinateur le phénomène contenu dans les équations mathématiques.

L'étude du non équilibre, des phénomènes transitoires*, l'histoire et la dynamique des systèmes, le chaos*, l'émergence* des phénomènes, autant de domaines difficiles à explorer de manière théorique et qui ont été accessibles par la simulation sur ordinateur.

Dans le cas d'un système complexe* pour lequel on ne possède pas d'équations, on peut formuler des hypothèses sur les causalités qui le régissent et en déduire un comportement dynamique que l'on simule sur l'ordinateur. La comparaison de la simulation et du phénomène réel permet de vérifier les hypothèses par leurs conséquences. Ce type de simulation est dit « ontomimétique ». C'est la construction d'un modèle ontologique et l'étude de son fonctionnement par voie numérique.

La simulation réalise la mimésis* au sens courant de l'apparence des choses. Elle n'est qu'apparence de la réalité. Une représentation* de la réalité.

SIMULATION DE MONTE-CARLO

Engendrement d'un ensemble de valeurs d'une grandeur aléatoire définie par sa loi de probabilité.

SIMULTANEITE

SOKAL (Affaire)

L'affaire Sokal qui va devenir l'affaire Sokal-Bricmont, commence avec un article du physicien américain Alan Sokal « *Transgressing the boundaries : toward a transformative hermeneutics*

of quantum gravity » (1996) publié dans un respectable journal de sociologie. Cet article s'avère une parodie et une satire, un canular, destiné à animer un dialogue à Gauche entre les humanistes et les scientifiques, entre les « deux cultures ». Il veut protester contre l'usage abusif et irrationnel de la science par les humanistes et contre une certaine dévalorisation de la science par sa socio-critique.

Cette affaire participe de toutes ces affaires où le rationalisme* cherche à pourfendre l'irrationalisme* ambiant. Tous les vingt ans, un milieu spirituel ou intellectuel se trouve « accusé » d'irrationalisme* et de subversion des conclusions de la philosophie des sciences comme celle concernant l'incommensurabilité* et la thèse de Duhem-Quine* sur la sous-détermination* des théories physiques.

Ce sont successivement l'affaire Planète (Bergier, Pauwels) dans les années 60, le Colloque de Cordoue (Cazenave), en 1979, l'affaire Sokal en 1996. Tous azimuts se trouvent visés, les ésotéristes, les parapsychologues, les psychanalystes*, les astrologues*, les homéopathes*, les contre-culturalistes, les hommes politiques, les économistes, les sociologues, les apologistes religieux, les philosophes post-modernes* et toutes sortes de curieux compagnons de route.

L'article parodique de Sokal se prolongera par un livre, en collaboration avec un philosophe des sciences belge, Jean Bricmont, où l'on trouvera une compilation étendue des abus de la mathématique et de la physique de la part des philosophes français post-modernes. Une charge contre l'usage abusif de la métaphore* scientifique dans les sciences humaines.

Remarquons ici que l'usage abusif des métaphores a été souvent le lot des sciences de la nature elles-mêmes. Toutes les idées qui ont circulé dans les années 50 entre théorie de l'information*, cybernétique*, biologie*, linguistique* se sont faites dans un flot de métaphores plus ou moins sauvages, fortement critiquées par les mathématiciens et les physiciens, faisant de la notion d'information, une métaphore de l'organisme*. Fallait-il traiter ces gens d'imposteurs ? Elles ont pourtant joué un rôle essentiel dans la formation de la théorie du code génétique*.

Mais au-delà de l'aspect anecdotique de l'affaire, le vrai débat est entre positivisme* et réalisme*. Toujours le même débat, comme celui de Lénine contre Mach* et les empiriocriticistes, mais avec une nouvelle tête de turc, la socio-critique historique de la science. Dans un autre article, Sokal souligne que son article parodique s'insère dans la polémique sur l'existence du monde extérieur. Il constate que les « cultural studies » soutiennent le dogme selon lequel il n'y a pas de monde extérieur. Ou bien qu'il existe un monde extérieur mais que la

science ne fournit de connaissance à son sujet. En tant que physicien profondément réaliste il se demande pourquoi il consacrerait sa vie à la science, si celle-ci n'est qu'une négociation de conventions sociales, sur ce que l'on convient d'appeler « vérité ».

SOLEIL

SOLIDE (Théorie du)

SOLIPSISME

Forme extrême d'empirisme* qui affirme que seul existe l'être humain et que le reste du monde est un produit de sa conscience. C'est une forme d'idéalisme* subjectif qui ne connaît d'autre réalité que le sujet pensant.

Descartes* de par sa prise de conscience du soi (« Je pense donc je suis ») a pu être accusé de solipsisme. L'empirisme de Berkeley* frôle le solipsisme. Husserl* dans la phénoménologie transcendantale* cherche à éviter cette accusation en s'appuyant sur l'inter-subjectivité*.

SOMA (Cellules somatiques)

Les cellules somatiques sont les cellules de l'organisme à l'exception des cellules germinales (gamètes*). Une mutation affectant une cellule somatique est en principe transmise à sa descendance, mais elle n'est pas héritée.

SOPHISME

Raisonnement volontairement logiquement faux, utilisé dans un discours qui dupe l'auditeur. Prise d'ascendant psychologique.

Tout ce qui est rare est cher (faux, car cela dépend du contexte socio-économique). Un trèfle à quatre feuilles est rare. Donc un trèfle à quatre feuille est cher. Les prémisses ne sont pas pertinentes à la validité de la conclusion.

Dans la Grèce antique, les sophistes dont le nom est à l'origine du terme sophisme, enseignaient l'éloquence et l'art de la persuasion. Et c'est pour démasquer leur rhétorique parfois fallacieuse que les philosophes ont posé les bases de la logique.

SOUS DETERMINATION des théories par les faits (Cf. Duhem-Quine- Thèse de)

Affirmation selon laquelle un ensemble de faits ne suffit pas à déterminer une théorie qui les rassemble. Ceci provient de ce que la liaison entre un fait* et un terme théorique* n'est pas définie avec précision.

SPECIFICITE / UNIVERSALITE

SPECTRE

Ensemble de valeurs possibles d'une grandeur mathématique ou physique, correspondant ou non à une caractéristique particulière. Le spectre peut être un ensemble discontinu (spectre discret ou spectre de raies*) ou un ensemble continu (spectre continu*).

Le terme spectre (latin spectrum) a été à l'origine utilisé par Newton pour désigner la suite ininterrompue de couleurs obtenue par passage de la lumière blanche à travers un prisme. C'est aussi le spectre des couleurs dans l'arc en ciel où les gouttelettes d'eau font fonction de prisme. Ce sont là des spectres physiques.

Par ailleurs on désigne par spectre l'ensemble des composantes en fréquence résultant de la transformation de Fourier* d'un signal* ou de la fonction d'autocorrélation* d'un signal aléatoire ou d'une fonction (spectre mathématique).

Par l'intermédiaire du prisme ou de tout autre dispositif analyseur le spectre physique révèle l'existence du spectre mathématique. Le spectre mathématique n'est pas un attribut* physique du signal, il en constitue une disposition* et avertit de l'existence possible d'un spectre physique qui apparaît par interaction du signal avec un dispositif analyseur approprié.

Prenons par exemple la question « en fait combien ai-je de doigts aux mains 10 ou $5+5$? ». A vrai dire cette question n'a pas de sens. Le terme ou n'est pas approprié. Ont également raison et celui qui dira qu'il y a dix doigts sur mes mains et celui qui affirmera que sur mes mains il y a $5+5$ doigts Auront également raison celui qui déclarera que mes mains comportent $3+7$ doigts. Tant que la discussion se borne à l'aspect mathématique, toutes ces représentations et beaucoup d'autres sont tout à fait équivalentes. Posons maintenant la question autrement que du point de vue mathématique mais du point de vue *physique*. Pour des tricoteuses de gants les représentations du nombre 10 comme $3 + 7$ ou comme $5 + 5$ ne sont évidemment pas équivalentes.

Lorsque le signal (lumière ou son) passe à travers un milieu absorbant (non transparent), il émerge avec une composition spectrale (mathématique) définie. Le spectre physique correspondant est appelé spectre d'absorption.

Les opérations physiques qui révèlent les spectres mathématiques des signaux en produisant des spectres physiques constituent un domaine expérimental de la physique appelé spectroscopie*.

SPECTRE CONTINU

SPECTROSCOPIE

Ensemble de procédés expérimentaux de production de spectres physiques pour l'étude de la composition spectrale des rayonnements et des signaux.

La principale spectroscopie est la spectroscopie optique, spectroscopie d'émission ou spectroscopie d'absorption du rayonnement électromagnétique. On distingue aussi différentes spectroscopies selon le domaine de fréquences de la lumière utilisée, car les phénomènes microscopiques impliqués sont très différents. Les phénomènes atomiques relèvent de la spectroscopie des rayons X ou de l'ultra-violet. Les propriétés électroniques des molécules sont révélées par la spectroscopie dans le visible ; c'est le royaume de la couleur. Les vibrations et rotations des molécules se manifestent dans la spectroscopie infra-rouge ou micro-ondes.

La physique atomique et la mécanique quantique se sont construites sur la spectroscopie atomique, en voulant rendre compte de l'existence des spectres de raies*.

SPIN

Moment de quantité de mouvement propre à une particule élémentaire, de nature quantique, sans liaison avec les déplacements de celle-ci. L'« image » de cette notion est dans un mouvement de rotation (spin) de la particule sur elle-même. Comme la masse* et la charge* c'est une caractéristique importante de la particule et doit donc jouer un rôle important dans la physique de celle-ci. C'est la seule observable quantique qui ne présente pas d'équivalent classique, contrairement, par exemple, à la position, l'impulsion ou l'énergie d'une particule. En fait le spin n'est rien d'autre qu'un nombre qui permet de classer les différentes représentations irréductibles non équivalentes du groupe des rotations. Il traduit l'existence de l'espace

des états* qui n'a aucun lien avec le déplacement des particules dans l'espace ordinaire..

Le spin s'exprime en unités de la constante de Planck* et est égal à Jh où J est un nombre entier ou demi-entier caractéristique de la particule, et qui apparaît comme un nouveau nombre quantique* que l'on désigne couramment par spin. Le spin de l'électron*, du proton*, du neutron*, du neutrino* et de leurs antiparticules* est égal à $\frac{1}{2}$, celui des mésons π et K est égal à 0, et celui du photon à 1.

La projection du spin sur une direction fixée quelconque ne peut prendre que les valeurs entières entre $-J$ et $+J$. Une particule de spin J ne peut se trouver que dans $2J+1$ états de spin (pour $J=1/2$ deux états de spin $-1/2$ et $+1/2$) ce qui est équivalent à l'existence d'un degré de liberté supplémentaire. Pour préciser l'état d'une particule il faut donner son état de spin. L'état total est le produit d'une fonction des coordonnées par une fonction de spin.

Au spin, quoiqu'il ne soit pas lié à une véritable rotation de la particule, correspond un moment magnétique* propre observable par son interaction avec un champ magnétique. C'est ainsi que l'on a découvert le spin de l'électron dans l'expérience de Stern et Gerlach (1922) , où l'on fait passer des atomes d'argent dans un champ magnétique non uniforme, et où le faisceau se sépare en deux

Le spin de la particule est univoquement lié au caractère de la particule. Comme l'a montré Pauli* il découle de la théorie quantique des champs que toutes les particules à spin entier relèvent de la statistique de Bose-Einstein*(ce sont des bosons*) et que toutes celles à spin demi-entier relèvent de la statistique de Fermi-Dirac* (ce sont des fermions*). Les fermions satisfont au principe d'exclusion de Pauli*. L'existence du spin dans les systèmes de particules identiques est à l'origine d'un effet quantique nouveau sans équivalent dans la physique classique, l'interaction d'échange*

Существование спина в системе тождественных взаимодействующих частиц является причиной нового квантовомеханического явления, не имеющего аналогии в классической механике: [обменного взаимодействия](#).

De nombreux phénomènes magnétiques de la physique font intervenir le spin. Le plus connu du grand public est la résonance magnétique nucléaire* à travers l'imagerie médicale (IRM). Elle met en jeu le spin nucléaire. Dans le domaine de la nanoscience* se développe une électronique de spin.

SPIN ISOTOPIQUE

En 1932, Werner Heisenberg avait remarqué que si l'on néglige la charge électrique et la faible différence de masse, le neutron et le proton se comportent presque de la même manière et il les avait appelés nucléons. Par analogie avec le spin de l'électron, il avait introduit le concept d'isospin (ou spin isotopique). De même qu'une particule de spin $\frac{1}{2}$ a deux projections de spin, $+\frac{1}{2}$ (spin up) et $-\frac{1}{2}$ (spin down), un nucléon a deux projections de l'isospin : $+\frac{1}{2}$ (qui correspond au proton et $-\frac{1}{2}$ qui correspond au neutron). Les protons et les neutrons sont essentiellement deux états de la même particule. Même si on ignore la charge, le proton et le neutron ne sont toujours pas complètement symétriques, le neutron est légèrement plus massif, et ainsi le spin isotopique n'est pas une symétrie parfaite de la force forte.

En fait si l'on ne peut distinguer proton et neutron par leurs états quantiques (fonctions d'ondes), on ne peut pas distinguer toutes les superpositions de ces états. La transition vers une de ces superpositions peut être représentée comme une rotation d'un certain angle dans un espace interne*, l'espace isotopique. Il est indifférent d'appeler proton, un proton véritable, ou une de ses superpositions avec un neutron. Il y a là une symétrie qui correspond à la conservation du spin isotopique.

Supposons maintenant deux laboratoires qui donnent le nom de proton à deux superpositions différentes, cela signifie que l'angle de rotation dans l'espace isotopique dépend des coordonnées dans l'espace-temps. Les équations du mouvement d'un nucléon (la variation de la fonction d'onde avec le temps) doit contenir des dérivées par rapport à l'espace temps. Ces équations contiennent donc un terme supplémentaire proportionnel à la dérivée de l'angle de rotation par rapport à l'espace et au temps. Si l'on suppose que les lois de la nature ne dépendent pas du choix d'une superposition, il faut introduire un champ qui compense en chaque point les variations de l'angle de rotation. C'est un champ de jauge* ou champ de compensation locale.

L'invariance isotopique est une propriété de symétrie des interactions fortes, entraînant l'existence de familles de hadrons voisins par la masse mais différents par la charge électrique. Les hadrons de chaque famille interagissent fortement avec d'autres hadrons de la même manière.

STABILITE

La stabilité est un terme général qui indique qu'une situation physique garde ses caractéristiques pour de petites perturbations ou variations des paramètres. Avec l'invariance* c'est une des grandes

qualités de propriétés rendant possible le discours et la pratique de la physique.

La stabilité concerne en général le mouvement* dont elle caractérise le comportement sur un temps long. La stabilité du mouvement* signifie que le mouvement s'écarte peu au cours du temps de son mouvement original sous l'effet de variations des conditions extérieures.

Une forme essentielle de stabilité se manifeste dans les processus stationnaires* en particulier périodiques (Cf. Cycle limite*) et lors d'états d'équilibre.

Si l'on caractérise le mouvement à l'aide de l'espace de phase*, la stabilité peut consister en la constance de certains traits du portrait de phase (Stabilité structurelle*).

La stabilité peut aussi signifier que tôt ou tard le mouvement peut revenir au voisinage de sa position initiale (Théorème du retour de Poincaré*) ;

On peut aussi parler de la stabilité d'une figure* ou d'une forme* dépendant d'un paramètre, comme la dépendance continue de ce paramètre.

Tout en détruisant les avantages de la stabilité, l'instabilité* introduit des phénomènes d'une grande importance et change la vision du monde.

STABILITE DU MOUVEMENT

Le mouvement d'un système est dit stable si sous l'effet de petites perturbations ce mouvement ne change pas ses caractéristiques d'une manière significative.

Si l'on précise les critères de stabilité on peut définir la stabilité de différentes façons. La stabilité se définit par le comportement des trajectoires dans l'espace de phase*, et l'on peut porter son attention soit sur les trajectoires individuelles soit sur les trajectoires voisines.

La stabilité selon Lagrange* suppose que l'état du système demeure à la l'intérieur d'une zone limitée de l'espace de phase.

La stabilité selon Poisson* signifie que le système revient régulièrement au voisinage de tout état initial (Retour de Poincaré*).

Alors que les critères précédents concernaient une seule trajectoire le critère de stabilité de Lyapounov* met en jeu des trajectoires voisines. Le mouvement est stable selon Lyapounov si les trajectoires issues d'états initiaux voisins restent voisines. Quand on parle de stabilité en général, c'est la stabilité selon Lyapounov qui est

entendue. Si une trajectoire non périodique est stable selon Poisson et Lyapounov elle est quasi-périodique.

La stabilité structurelle* est la stabilité topologique de l'espace de phase lors de petites modifications de la loi du mouvement.

STABILITE D'UN EQUILIBRE

Un équilibre* est dit stable si sous l'effet de petites perturbations le système tout en s'écartant de l'équilibre y revient après un temps plus ou moins long, au cours duquel il aura pu effectuer des petites oscillations qui s'amortissent.

Les conditions de stabilité d'un équilibre ont été étudiées d'une manière générale par Lyapounov*, qui retrouve la condition générale de la stabilité de l'équilibre d'un système conservatif*, correspondre à un minimum isolé de l'énergie potentielle (Théorème de Lagrange-Dirichlet). Au fond d'un puits de potentiel* l'équilibre est stable.

STABILITE D'UN EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

STABILITE STRUCTURELLE

La stabilité structurelle est la propriété que possède un système dynamique* de conserver le même portrait topologique de l'espace de phase lors de perturbations ou de modifications du mouvement suffisamment faibles. La perturbation ne porte plus sur les conditions initiales mais sur la loi du mouvement. Il s'agit de la conservation de la nature des singularités et de leur environnement et de la persistance des cycles limites*. Intuitivement une situation est structurellement stable quand les situations voisines lui ressemblent. Cette ressemblance peut être définie comme l'existence d'une homéomorphie* envoyant les trajectoires des deux situations voisines l'une sur l'autre en conservant le sens des temps croissants. On ne fait donc plus de différence entre une orbite périodique de période une seconde et une orbite périodique de période dix millions d'années.

Introduite en 1937 par Andronov et Pontryaguine cette notion a joué un grand rôle historique dans la compréhension du phénomène du chaos*(Cf. Dynamique non linéaire et chaos –historique-*) et s'est trouvée à l'origine de la théorie des catastrophes*. L'importance de cette notion vient de ce que la mise en théorie d'un phénomène s'appuie sur des observations qui ne sont qu'approchées ; il serait catastrophique qu'un perfectionnement de la technique des

observations rendit la théorie précédemment élaborée inutilisable en modifiant profondément l'allure des trajectoires.

La stabilité structurelle pose des problèmes difficiles, très imparfaitement résolus jusqu'ici : les propositions un peu générales que l'on possède sont peu utilisables, et les propositions utilisables ne portent guère que sur des cas particuliers par exemple pour des systèmes dans le plan. Ainsi tous les systèmes à deux dimensions sont structurellement stables, et pour des dimensions supérieures, les systèmes chaotiques (K systèmes) sont structurellement stables.

Le développement de la théorie des systèmes dynamiques* différentiables a été dans une grande mesure lié à l'étude de questions qui se trouvaient directement ou indirectement en relation avec les systèmes structurellement stables, et c'est précisément cette étude qui a joué un grand rôle dans la mise en forme de cette théorie comme partie autonome des mathématiques.

STABILITE STRUCTURELLE (Problématiques et enjeux)

Dés le début de son livre « *Stabilité structurelle et morphogénèse* » (1972), René Thom* livre le fond de sa pensée :

« La notion de stabilité structurelle est, à mes yeux, une notion clé dans l'interprétation des phénomènes, de quelque discipline scientifique que ce soit (sauf peut être en physique quantique), et on expliquera tout à l'heure pourquoi. En attendant observons seulement que les formes* subjectivement identifiables, les formes pourvues d'une dénomination, représentées dans le langage par un substantif, sont nécessairement des formes structurellement stables »*

En écrivant cela, Thom proclame sa devise, en un langage beaucoup plus intuitif que mathématique. Rien de ce qui est dit là n'est démontré. C'est un programme fondé sur une grande idée force : face aux contingences du réel, le cerveau humain cherche à concevoir des situations stables. Thom pense que la stabilité structurelle est la solution de ce problème et entreprend une croisade en faveur de ce concept. Le sens de cette croisade a échappé à la plupart des commentateurs, obnubilés par la trop médiatique Théorie des catastrophes*, issue précisément de l'idée de stabilité structurelle. Cette idée est difficile à mettre en œuvre, comme Thom lui-même l'a constaté, et partant encore largement absente dans la culture contemporaine.

Et pourtant la notion générale de stabilité fait son chemin, en particulier dans les sciences cognitives*. Témoin le discours tenu par Seymour Zeki, célèbre neurophysiologiste, qui a découvert l'aire V4 du cortex cérébral où s'effectue « la construction » de la couleur*. Dans un texte qui mérite une lecture attentive, « Splendours and miseries of the brain » (1999), il décrit comment la couleur est une construction stable, que le cerveau effectue à partir des perceptions éminemment instables, enregistrées par l'œil. Une démarche que Platon* envisageait déjà d'une manière métaphysique* par recours à des invariants, les Idées. Il considérait que la seule connaissance qui mérite d'être acquise est celle des propriétés constantes et non changeantes de tout ce qui est dans l'univers. Les Idées appartiennent à l'univers supra-sensible, accessible seulement par la pensée.

Toute la problématique de la reconnaissance des objets* et des formes*, de la représentation des images* sous une forme stable par rapport aux variations de contraste, de la mise en relief des contours et des frontières, implique des phénomènes physico-chimiques où intervient la stabilité structurelle.

Quant enfin à la page 43 de son livre, Thom définit la stabilité structurelle, on apprend que c'est la propriété d'un système dynamique* de ne pas voir son comportement qualitatif modifié par une assez petite perturbation. Sous le vocable qualitatif il se place dans l'idéologie* qualitative inaugurée par Poincaré*. Les détails du mouvement important peu. Les caractéristiques marquantes (singularités*, attracteurs*) doivent rester intactes.

Voilà bien ce qui a l'air de se produire dans un être vivant, où de la naissance à la mort, toutes les molécules sont sans cesse renouvelées, et l'être conserve néanmoins durant toute sa vie des caractéristiques fondamentales invariantes.

Dès 1960, influencé par son collègue américain Salomon Lefshetz, qui, d'origine russe, suivait les travaux de l'école de Gorki (Andronov*), Thom part en croisade pour la stabilité structurelle*. Où se cache-t-elle ? La réponse sonne comme une révolution culturelle : le chaos déterministe est structurellement stable (Cf. Dynamique non linéaire et chaos*-Historique). Des systèmes trop rigides ou par trop prévisibles ne sont pas structurellement stables. La mécanique classique hamiltonienne* n'est pas en général structurellement stable.

On peut avancer l'hypothèse selon laquelle « les formes symboliques de Cassirer* (Cf. Gnoséologie*), en tant que formes de pensée ou régimes de déploiement de la connaissance, correspondent à des phases successives de la culture réalisant de mieux en mieux « un objectif de stabilité structurelle ». Et ceci grâce à une évolution du

rapport sujet-objet, de la fusion, à la séparation et enfin à la « disparition » de l'objet.

La pensée mythique est un mode de pensée comportant une différenciation imprécise du sujet et de l'objet, du signifié* et du signe*, des choses et des mots, des êtres et de leurs noms, des relations spatiales et temporelles. Elle est caractéristique de sociétés où domine un collectivisme primitif structuré par les relations de parenté. La grande famille. Le monde est vécu dans une perspective organique, fluctuante, instable, vivante.

L'établissement d'une structure abstraite de la réalité devient nécessaire pour les sociétés où apparaissent des distinctions sociales. Ainsi par exemple l'esclavagisme a apporté avec lui la nécessité stricte de distinguer le travail intellectuel du travail physique, entraînant la distinction entre la chose et l'homme qui possède cette chose. Une séparation sujet-objet entérinée par la pensée langagière. C'est là l'origine de la conception grecque d'une matière privée d'initiative propre, réduite à l'état de potentia*, alors que le propriétaire d'esclaves est « l'idée créatrice de formes ». Formes séparées chez Platon* ou hylémorphisme* aristotélien participent à des degrés divers de cette mise à distance de l'objet et du sujet, rendant l'objet plus sûr.

Mais le sujet reste fondu dans un corps social et il faudra l'essor de l'idéologie individualiste à la fin du Moyen Age, parallèlement à une idéologie de la marchandise, pour voir le sujet s'émanciper et assister à une disparition de l'objet, au profit de son abstraction*, condition de l'émergence de la pensée scientifique. C'est qu'individus comme marchandises deviennent des entités mobiles, interchangeables, susceptibles d'être « agis » Ils deviennent des acteurs abstraits, virtuels* même, échappant ainsi aux vicissitudes de la vie réelle. L'abstraction garantit une stabilité des choses en les soustrayant à la contingence du réel. Ce qu'au fil de longues pages Husserl* regrette amèrement, prônant le détour des sciences objectives au profit du « monde de la vie ».

STATIONNAIRE (PROCESSUS)

Processus dans un système physique qui évolue en gardant une valeur constante à certaines grandeurs caractéristiques. La plus grande partie de la physique décrit des phénomènes stationnaires, c.a.d. en fait des phénomènes munis d'une forme*. Elle a bien du mal à décrire les processus évolutifs* ou transitoires* qui sont à l'origine de cette forme. Les phénomènes d'auto-oscillation* ou d'auto-

organisation* sont des cas typiques où l'origine de la stationnarité est élucidée avec précision dans des cas particuliers.. Mais bien des phénomènes stationnaires gardent un mystère des origines, que ce soit les états stationnaires de la mécanique quantique, la stationnarité du vivant constitué ou celle de l'univers* à l'issu d'un processus de création inconnu.

STATISTIQUE

STATISTIQUE (MECANIQUE)

STATISTIQUE (PHYSIQUE)

STATISTIQUE QUANTIQUE

STRUCTURALISME

Type de philosophie systémique, c'est à dire de point de vue sur le rapport entre les Parties et le Tout*. En substituant le système* au sujet on fait de la totalité la seule réalité.

Le structuralisme considère que dans le Tout, toutes les choses, les relations, les lois, les niveaux d'organisation et les processus sont des Parties qui dépendent du Tout. Le structuralisme est une attitude d'analyse du Tout dans des circonstances où le Tout n'est pas simplement la somme des Parties. Le Tout existe jusque dans les Parties, si bien que la reconstitution du Tout à partir des Parties est une procédure forcément nonlinéaire*. Les Parties n'existent pas en l'absence du Tout, ce qui est le contrepied absolu de l'Atomisme*.

Le structuralisme porte toute son attention sur le réseau des relations (la structure*) qui est la raison constituante de l'existence du Tout.

Le structuralisme s'est manifesté en mathématiques par l'introduction de la notion de structures algébriques* dont le groupe* est le représentant par excellence.

Le structuralisme s'est manifesté dans les Sciences Humaines dans les années 20, tout d'abord en linguistique (linguistique structurale*), puis a été étendu à la critique littéraire, l'ethnologie et quelques autres disciplines. Ce mouvement a connu une grande effervescence en France dans les années soixante, où il a été illustré par C. Lévi-Strauss, M. Foucault, J. Derrida, J. Lacan et R. Barthes. Le sémioticien italien U. Eco et le psychologue suisse J. Piaget* sont aussi des structuralistes.

La première extension du modèle linguistique, concerne les structures de la parenté, qui forment le noyau dur de l'anthropologie structurale. En effet, l'organisation des relations de parenté dans la société présente une analogie fondamentale avec les systèmes phonologiques 1) ce sont des systèmes, où les éléments différentiels sont seuls significatifs (père-fils, frère-sœur, mari-femme, oncle-neveu, etc.), les termes considérés séparément n'étant rien. Ainsi le système ne fonctionne pas au niveau des termes, mais des couples relationnels. 2) ces systèmes peuvent être construits sans tenir compte de l'histoire, de la psychologie des éléments ni du contexte: non pas que la synchronie considère l'état d'un système de parenté à une date donnée, puisque le système fonctionne par des échanges, femmes données et rendues, qui ne se stabilisent qu'avec plusieurs générations, mais que l'on peut considérer le système de ces échanges comme une totalité régulière, fonctionnelle et finie, en dehors des vicissitudes historiques du groupe social. 3) enfin, ce sont des systèmes inconscients, qui débordent la volonté individuelle, et dont les acteurs suivent les règles qui structurent leurs choix sans jamais avoir conscience des règles elles-mêmes. Ces trois caractères expliquent comment Lévi-Strauss a pu procéder à une étude structurale des systèmes de parenté, et pourquoi selon lui "le domaine de la parenté est celui qui revient en propre à l'ethnologue. Nous sommes donc ici au cœur de l'ethnologie structurale.

« Les structures élémentaires de la parenté » reposent sur un principe qui est la clef de toute cette démonstration de Lévi-Strauss, et qui est la prohibition de l'inceste. En effet, cette interdiction adopte des modalités différentes selon les sociétés (ce ne sont pas toujours les mêmes relations qui sont interdites), mais le fait même qu'une alliance matrimoniale soit impossible à l'intérieur de la famille "biologique" (ni père-fille, ni mère-fils, ni frère-soeur) est un fait universel. Est-ce donc un fait naturel ou culturel? Lévi-Strauss note que tout ce qui est universel et spontané chez l'homme relève de la nature, et que tout ce qui est particulier, relatif à une norme, relève de la culture. *"Nous nous trouvons alors confrontés avec un fait, ou plutôt un ensemble de faits, qui n'est pas loin, à la lumière des définitions précédentes, d'apparaître comme un scandale: (...) car la prohibition de l'inceste présente sans la moindre équivoque, et indissolublement réunis, les deux caractères où nous avons reconnu les attributs contradictoires de deux ordres exclusifs: elle constitue une règle, mais une règle qui, seule entre toutes règles sociales, possède en même temps un caractère d'universalité"*. La prohibition de l'inceste n'est pas biologique, mais elle est invariante; c'est parce qu'elle est l'origine de toute culture,

c'est-à-dire que c'est par elle que se fait le clivage, la différence entre la nature et la culture et le passage de l'une à l'autre: il faut donner (échange social) ce que la nature nous a donné (relations biologiques). La culture, c'est-à-dire le système social de la communication et de l'échange, commence avec la prohibition de l'inceste, et c'est pourquoi les règles particulières de la parenté reposent toujours en dernière instance sur cette règle de l'inceste qui est la règle de l'échange: une structure invariante. Voilà pourquoi et comment on peut atteindre la nature humaine, l'invariant, dans la culture, le variable.

Entre le structuralisme et la cybernétique il existe une profonde parenté méthodologique et historique, qui s'affiche dans leur caractère de doctrine relationnelle* et leur méthodologie de modélisation* abstraite. (Cf. Cybernétique et structuralisme*)

La Mécanique Quantique est une doctrine éminemment kstructuraliste qui étudie avant tout la structure de l'ensemble des opérations de mesure sur les objets microphysiques, mis eux mêmes entre parenthèses dans une Boîte Noire*. Le dualisme onde-corpuscule* n'y est pas un point de vue atomiste sur l'objet quantique, où onde et corpuscule existant par eux mêmes concourraient à la formation de l'objet, mais une analyse du Tout qu'est l'état* de l'objet en termes de points de vue partiels (onde, corpuscule) qui contiennent toujours la trace du Tout.

A un structuralisme logico-algébrique, proche de l'hylémorphisme* aristotélien, succède aujourd'hui, sous l'influence de la théorie des systèmes dynamiques* un structuralisme topologico-dynamique, proche d'une morphogénèse* où les structures émergent des dynamiques sous jacentes à travers des phénomènes d'(auto)-organisation*. Il y a là une tendance très marquée au naturalisme* dans la formulation du structuralisme. C'est le cas pour la théorie des catastrophes* ou le connexionisme dans les sciences cognitives*.

Autour des « structures » s'est produite la rencontre entre trois sphères culturelles, parisiennes pour l'essentiel, bien précises : les « structuralistes » qui autour et à la suite de Claude Levi-Strauss cherchaient à promouvoir une approche nouvelle des sciences humaines ; les « bourbakistes* » cherchant à établir une nouvelle vision de « la mathématique » sur la notion de « structure » ; et les « Oulipiens », auteurs réunis au sein de l'Ouvroir de littérature potentielle pour explorer la littérature qu'il était possible d'écrire sur la base de contraintes plus ou moins structurales.

STRUCTURALISME EN PHYSIQUE

Face aux difficultés en physique d'un réalisme* des objets et à cause des tentatives de formulation d'une théorie générale des systèmes physiques*, on a assisté à de nombreuses entreprises d'élucidation des structures* des théories physiques, comme représentation de réseaux de relations entre les choses.

S'il devient impossible de penser que les théories physiques représentent fidèlement l'« essence » et les propriétés intrinsèques des choses qui existent dans le monde, alors on veut au moins espérer qu'elles représentent fidèlement le réseau des relations qui prévalent entre ces choses. Cela est d'autant plus vraisemblable que les théories physiques, loin de se résumer à un ensemble de termes et de propositions incorporables dans la langue, sont entièrement fondées sur les mathématiques. Or, selon une conception assez répandue, les mathématiques ne sont pas une science d'objets, mais une science de positions (ou nœuds) dans des réseaux complexes de relations de cohérence mutuelle ou de dérivation.

On a cherché à dégager les structures logiques*, les structures algébriques*, les structures topologiques*, les structures géométriques* telles les structures symplectiques*...de la physique. Une analogie possible dans le domaine des sciences physiques avec le programme de Bourbaki (Bourbakisme*) en mathématiques. Avec toujours la question lancinante de savoir si ces structures sont ontologiquement présentes dans la nature ou si ce ne sont que des structures de la connaissance. Le structuralisme dont il est question est-il nécessairement d'ordre ontologique*, comme l'espèrent les défenseurs du «réalisme structural*», ou d'ordre épistémologique* ? Est-il lié à la thèse d'un caractère structural-relational de la «nature», ou peut-il en venir à admettre que les structures sont propres à l'acte de connaître ? Cette distinction même entre ontologie et épistémologie des relations est-elle pertinente? Si l'on adhère à l'option d'un structuralisme ontologique, quels outils conceptuels sont disponibles pour comprendre le mode d'existence hors du commun que suppose le slogan « relations sans relata », typique du structuralisme ?

Les démarches structuralistes en physique ont en particulier pour but d'éclaircir le problème des relations entre les différentes théories* et celui plus étroit du réductionnisme*. Mais elles cherchent aussi à définir une stratégie générale pour la construction d'une théorie physique le plus souvent d'une manière axiomatique* comme dans les axiomatiques quantiques*.

STRUCTURE

La structure d'un système* est un ensemble de relations entre les sous-systèmes qui fonde l'existence du système en tant que tel..

On peut définir différentes structures selon la décomposition en sous-systèmes considérée.

La structure est une forme* relationnelle émergente réalisant un hylémorphisme* de type aristotélien.

La structure n'a pas la même réalité empirique que la substance*, elle ne s'exprime pas directement mais à travers les modèles* construits pour représenter la réalité.

La structure est l'objet privilégié du réalisme structural*.

La structure est le concept fondamental d'un courant de pensée contemporain, le structuralisme*, qui occupe dans la culture la même position que la doctrine de la forme substantielle* dans la scholastique* médiévale.

STRUCTURE ALGEBRIQUE

Une structure algébrique est définie sur un ensemble* lorsque l'on muni cet ensemble d'une ou de plusieurs lois de composition interne*, ces différentes lois ayant des relations entre elles.

La structure de groupe* est donnée par une loi de composition interne. Un espace vectoriel* est un groupe, où l'addition de deux vecteurs est un vecteur. Les rotations dans un plan ont une structure de groupe définie par le produit des rotations.

Un anneau ou une algèbre* sont définis par deux lois de compositions internes analogues à la multiplication et à l'addition, ce qui comporte des conditions de distributivité.

STRUCTURES ALGEBRIQUES DE LA PHYSIQUE

La physique contemporaine est marquée au sceau d'un structuralisme* qui pénètre tous les domaines des mathématiques. Le projet Bourbaki* de déduire toute la mathématique de la théorie des ensembles* et de l'algèbre abstraite* correspond à un état d'esprit largement répandu en physique. L'appareil mathématique auquel faisait appel la physique classique était dominé par l'analyse infinitésimale*. Une théorie c'était une équation différentielle.

Lagrange* pouvait appeler sa mécanique « Mécanique analytique*). La mathématique a changé et découvert les vertus de l'algèbre abstraite*. La physique en a fait autant. Une théorie aujourd'hui c'est un calcul algébrique sur les observables*. La théorie de la relativité et la mécanique quantique en sont largement responsables

Depuis l'étude des groupes de symétrie en cristallographie* et le théorème de Noether* en mécanique, avec l'emploi de l'algèbre linéaire* en relativité* (tenseurs*) et en mécanique quantique (opérateurs* dans un espace vectoriel*) l'algèbre abstraite a envahi la physique.

L'étude des groupes de symétrie*, tant pour l'espace-temps* ordinaire que pour l'espace interne* (théories de jauge*) occupent une place centrale. Les propriétés physiques des corps dépendent de leur symétrie, ainsi l'oxygène O_2 ou le benzène C_6H_6 n'ont pas de propriétés électriques (moment dipolaire*), alors que la polarité de l'eau entre en jeu dans son rôle extraordinaire sur notre planète. La brisure de symétrie* joue un rôle vedette dans l'apparition des formes* (Cf. Brisure de symétrie et morphogénèse) et dans la théorie du modèle standard* (théorème de Goldstone*).

De nombreuses théories voient leur formulation se transformer par l'emploi d'algèbres* de classes d'observables, comme c'est le cas en mécanique statistique* et en mécanique quantique par l'emploi de C^* algèbres.

On peut envisager une reformulation algébrique d'un certain nombre de théories physiques fondamentales. On aperçoit alors un projet d'unification de la physique par l'algèbre, une physique algébrique.

STRUCTURE DISSIPATIVE

STRUCTURES GEOMETRIQUES DE LA PHYSIQUE

STRUCTURES TOPOLOGIQUES DE LA PHYSIQUE

SUBJECTIVITE

SUBQUANTIQUE (Niveau. Milieu)

Niveau de description ou milieu imaginaire censé représenter une réalité objective, indépendante de nos observations, derrière le formalisme de la mécanique quantique. Niveau où se manifesteraient des variables cachées*.

SUBSTANCE

Le terme substance, à travers une multitude de contenus exprime une problématique permanente de la pensée philosophique (métaphysique*) dont l'origine se trouve chez Platon et Aristote. La substance est ce qui a une existence propre, ce qui existe par soi même. C'est l'expression visible ou invisible de l'être. C'est le Sujet, dans la langue, comme dans la réalité physique. C'est ce qui est stable et permanent dans un monde en modification constante. C'est le support des propriétés accidentelles* (qui peuvent varier) et de ce fait le noyau des propriétés essentielles (permanentes). Substance est souvent confondu avec essence*. C'est en dernier ressort ce qui fait que les choses* sont ce qu'elles sont (ousia*, quiddité*)

Au sens antique, la substance est constituée par la coexistence de deux principes qui ne peuvent être isolés que par l'abstraction: la substance matérielle et la substance formelle, la matière* et la forme*. La matière est en puissance* de la forme. La forme actualise* la matière en la rendant substance.

Mais à partir du XVIIème siècle la substance prend le sens de matière-substrat*

SUBSTANTIALISME

Attitude générale attribuant un rôle fondamental aux substances dans la constitution du monde, et ce dans tous les sens possibles du concept de substance*. Le monde est toujours une manifestation des propriétés* des substances ou des relations* entre les substances. C'est là une vision réaliste* privilégiant le rôle des choses. Le substantialisme s'oppose au relationnalisme* et profite des difficultés de formulation de cette doctrine. Il constitue le fondement de la physique classique de la matière et de l'espace, telle que l'a formulée Newton, en opposition à Leibniz. La querelle substantialisme/relationnalisme réapparaît à nouveau dans le contexte de la théorie des champs et des conceptions de l'espace-temps. Tout comme pour l'espace, on peut s'interroger sur la nature substantielle du vide. En fait une grande partie de la physique semble tenir un discours substantialiste (« comme ça ») alors qu'en fait elle tient un discours symbolique (« comme si »). La substance lui échappe, et ce renoncement à la substance n'a pas lieu sans de profondes réticences de la part du physicien et du grand public.

SUBSTRAT

SUPERPOSITION (en opposition à mélange*)

Le mot superposition prête à confusion. Dans la langue courante il signifie placer deux choses l'une sur l'autre sans les modifier.

Dans la physique il s'emploie pour signifier l'addition de deux grandeurs, et a une signification arithmétique. La physique linéaire est la physique des phénomènes où les grandeurs physique de même nature définissent par addition de leurs valeurs, les valeurs d'une grandeur physique du même type. Ainsi les vitesses ou les forces s'ajoutent librement selon les circonstances physiques, alors que les températures ne sont pas additives.

SUPERPOSITION (PRINCIPE DE)

Hypothèse selon laquelle l'effet résultant de l'action de plusieurs processus sur un système est la somme des effets des actions résultant de chaque processus individuellement, à condition que ceux-ci soient indépendants. Le principe de superposition s'applique aux systèmes linéaires*, c.a.d. ceux dont le comportement est décrit par des équations linéaires, où la somme de deux solutions reste une solution. Les phénomènes d'interférence* des ondes résultent du principe de superposition. Lorsque les propriétés d'un milieu dans lequel se déplace une onde linéaire ne sont pas modifiés par la présence de l'onde, tous les effets de cette onde peuvent être obtenus comme la somme des effets des composantes de Fourier* de l'onde.

Si les équations décrivant un processus ne sont pas linéaires le principe de superposition ne s'applique pas. C'est le cas pour un fort champ de gravitation* solution des équations non linéaires d'Einstein. C'est le cas pour un champ électromagnétique* dans un milieu où les perméabilités électriques et magnétiques dépendent du champ, rendant les équations de Maxwell non linéaires (Cf. Optique non linéaire*).

SUPERPOSITION DES ETATS (en MECANIQUE QUANTIQUE)

C'est un principe de la mécanique quantique motivé par le besoin de formaliser le dualisme onde-corpuscule* et qui s'avère permettre l'explication des phénomènes d'interférences* des particules élémentaires, des atomes et des molécules. Mais au lieu de superposer des ondes on superpose des états*. Ce principe est à la racine de la mécanique quantique, et tout l'appareil mathématique en découle.

Ce principe applique le principe de superposition* aux états* d'un système quantique, solutions de l'équation de Schrödinger*,

équation linéaire, affirmant par là que l'ensemble des états forme un espace vectoriel*. C'est là le cœur dur de la linéarité de la mécanique quantique.

Avant toute mesure on se trouve dans l'incertitude. La seule connaissance indique que deux états sont possibles et leur somme représente naturellement notre connaissance. C'est de cette somme que proviennent après mesure les figures d'interférence observées. Ces figures disparaissent si l'on cherche par une mesure à déterminer le trou par lequel passe l'électron, provoquant ainsi la réduction* de l'état de superposition.

La superposition des états n'est en aucune manière la superposition d'ondes de de Broglie*, même si les phénomènes d'interférence pour les particules ont été considérés comme prouvant le bien fondé de l'hypothèse de de Broglie.

L'enchevêtrement est une conséquence du principe de superposition.

En aucun cas on ne peut considérer un état de superposition comme autre chose qu'un procédé de calcul, même s'il serait tentant d'y voir la trace d'une superposition physique.

C'est pourtant ce que font certains expérimentateurs réalistes, sortant par là du cadre de la mécanique quantique pour expliquer leurs expériences.

"La théorie quantique, centrale à notre compréhension de la nature, introduit en physique microscopique les notions essentielles de superpositions d'états et d'intrication quantique, qui nous apparaissent comme "" étranges "" et contre-intuitives. Les interférences quantiques et la non-localité - conséquences directes du principe de superposition et de l'intrication - ne sont en effet pas observables sur les objets macroscopiques de notre expérience quotidienne. Le couplage inévitable de ces objets avec leur environnement détruit très vite les relations de phase entre les états quantiques. C'est le phénomène de la décohérence qui explique pourquoi autour de nous l'étrangeté quantique est généralement voilée. Pendant longtemps, superpositions, intrication et décohérence sont restés des concepts analysés à l'aide d'" expériences de pensée " virtuelles, dont celle du chat de Schrödinger à la fois mort et vivant est la plus connue. À la fin du XXe siècle, les progrès de la technologie ont rendu réalisables des versions de laboratoire simples de ces expériences. On peut maintenant piéger et manipuler des atomes et des photons un par un et construire des systèmes de particules suspendus entre deux états quantiques distincts qui apparaissent ainsi comme des

modèles réduits de chats de Schrödinger. Au delà de la curiosité scientifique et du défi que constitue l'observation de l'étrangeté quantique pour ainsi dire *in vivo*, ces expériences éclairent la frontière entre les mondes classique et quantique et ouvrent des perspectives fascinantes d'applications. " (Serge Haroche)

SUPERSYMETRIE

Invariance par rapport à la transformation qui échange les bosons* et les fermions*. On suppose que la supersymétrie se manifeste à des échelles infinitésimales de l'ordre de la longueur de Planck*. C'est un cas particulier de l'invariance de jauge*.

SUPERUNIFICATION

Théorie qui unifierait les champs décrivant les forces électromagnétiques, fortes, faibles et gravitationnelles, à l'instar de la théorie électrofaible unissant le champ électromagnétique et le champ de l'interaction faible, ou de la Grande Unification* du Modèle Standard*. Les tentatives actuelles sont peu convaincantes

SUPERVENIENNE (Dépendance générale. Résonance sémantique ou phénoménologique)

Un lien. Une forme de dépendance générale entre deux caractéristiques ou propriétés, telle qu'il ne puisse y avoir de différence dans la première sans qu'il y ait de différence dans la seconde, sans que le contraire soit vrai.

On a formulé l'hypothèse que les propriétés mentales sont en relation de supervénience, plutôt qu'en relation d'identité ou en relation physique avec les propriétés physico-chimiques ou neurobiologiques.

On peut penser qu'entre les propriétés et les faits d'une simulation (le "comme si" de la physique) et les propriétés et les faits réels (le "comme ça") il y a une relation de supervénience.

Le "Comme si" est greffé sur un "Comme ça" hypothétique, dans une relation de supervénience. On veut marquer ainsi le fait que le rapport entre les deux n'est pas de type réductionniste* mais plutôt de type émergentiste* .

La supervénience est une forme de reflet*.

SUPRACONDUCTIVITE

SUPRAFLUIDITE

SURDETERMINATION des faits par les théories

Thèse anti-empiriste* selon laquelle il n'y a pas de faits* purs et durs, indépendamment de toute théorie. Les faits ne peuvent être appréhendés qu'à travers le filtre de la théorie qui commande leur observation. Les faits ne prennent consistance qu'à travers les préjugés mentaux comme l'illustrent abondamment les exemples de la théorie psychologique de la Gestalt*.

SURREALISME

Mouvement artistique et intellectuel initié par André Breton après la première guerre mondiale. Mouvement marquant une révolte contre la culture bourgeoise présent depuis le début du siècle et accentué par la guerre. Mouvement imprégné de marxisme* et d'idéologie révolutionnaire sous l'influence des changements historiques vécus par la Russie.

Un non conformisme en tout sens jouant le rôle de pôle d'attraction, de référence, d'amorçage et de désamorçage de conflits idéologiques. Un intellectualisme qui se veut sans cesse anti-intellectuel tout en restant intelligent.

Un pollinisateur de concepts et de visions nouvelles, ayant contribué à faire entrer dans le champ de la culture nombre d'activités et d'œuvres non prises en compte jusqu'alors.

De la psychanalyse* à la peinture des aliénés, en passant par l'art océanien, l'art naïf et l'art populaire, les créations de demeures oniriques, les transversions de l'objet, l'écriture automatique, la fascination du geste (Tu jettes, je prends), le surréalisme est à l'origine de bien des manières de voir, nouvelles en ce temps là.

Mais comme tous les grands mouvements d'idées il meurt lorsque ses conceptions se banalisent en entrant dans la culture. Curieusement, en France tout au moins, 1968 marque le déclin simultané du surréalisme (sa mort même), du structuralisme*et du marxisme philosophique. Un changement total de paysage idéologique.

SYMBOLE

Le symbole est un signe* où le signifiant* est lié à un signifié* (ou un référent*) de manière arbitraire conventionnelle. L'activité symbolique consiste à associer un ou plusieurs signes à un même sens,

à changer de signe sans changer de signification. Elle s'oppose à priori à l'activité métaphorique* qui consiste à changer de sens sans changer de signe. Mais symbole et métaphore sont étroitement associés dans le discours lors des glissements qui président à la création du sens. Car changer de signe ouvre toujours la voie à un changement métaphorique du sens. Le symbole n'est pas une dénotation* mais plutôt une expression*.

Le mot symbole est couramment utilisé de manière impropre pour désigner le signifiant* d'un signe* sans se préoccuper d'une quelconque signification*. On parle ainsi de symboles mathématiques.

SYMBOLISME

Le symbolisme, activité de création de symboles*, est une des manifestations les plus éclatantes de la spécificité des processus cognitifs chez l'homme. Il est profondément lié aux facultés de distanciation et d'autonomie par rapport au réel. Il est la capacité de dédoubler l'objet de sa représentation et la représentation de son signe. Il est le mode de manifestation de l'invisible et du non-présent. C'est un des produits de l'imaginaire*. Il est le mécanisme par lequel l'homme échappe à la littéralité. Il s'éloigne du réel pour mieux y revenir et l'appréhender.

La biosémiotique* voit l'activité biologique comme l'origine du symbolisme. Celui-ci est lié aux activités vitales essentielles. Il pourrait provenir de la recherche d'une stabilité structurelle* (Cf. Stabilité structurelle-Problématique et enjeux*) face à la contingence du réel.

SYMBOLISME EN PHYSIQUE

Le symbolisme en physique est un point de vue épistémologique selon lequel les concepts de la physique ne sont pas des imitations* ou des représentations* de choses existantes mais seulement des symboles* mettant en ordre et en relation la réalité d'une manière fonctionnelle. Les objets de la physique ne sont pas les signes* de quelque chose d'objectif mais des signes objectifs à l'intérieur d'un cadre théorique. C'est un point de vue antiréaliste*, car le symbole est un signe* où le rapport entre le signifiant* et le signifié* est purement conventionnel.

C'est là une démarche qui remonte à Leibniz* dans sa conception de la connaissance symbolique, de son examen de la relation entre les choses et les mots, entre le signe* et ce qu'il désigne, et de sa théorie de l'expression*. Leibniz insiste sur la *cognitio symbolica*, selon laquelle l'homme ne peut penser et connaître qu'à

l'aide de signes naturels ou artificiels, à caractère symbolique, c.a.d. ne constituant pas une image directe de la réalité.

Cette tradition conceptuelle va jouer un rôle important dans la pensée de Kant* tout en y subissant des transformations profondes. Kant développe sa théorie des schémas comme procédure qui nous permet de fournir une image pour un concept, une procédure universelle d'imagination*.

C'est la redécouverte de l'œuvre de Leibniz au début du XIX^e siècle en Allemagne puis son influence explicite sur les travaux de la logique* moderne en particulier chez Frege* et le rôle essentiel des symboles* dans les conceptions logiques de Boole* en Angleterre, qui vont acclimater les conceptions du symbolisme* dans la formulation des lois de la pensée.

Dès le milieu du XIX^e siècle le physiologiste et physicien allemand Helmholtz* s'inscrit dans la lignée de Kant en soulignant que nos représentations du monde extérieur sont conditionnées par nos modes de perception et l'organisation de notre esprit. Nos sensations sont uniquement des signes* et non des images* des choses. Helmholtz déjoue le piège physicaliste dans la théorie de la perception*. Le signe* n'a pas nécessairement une ressemblance avec ce dont il est le signe. La nature du signe n'a pas d'importance, ce sont les lois entre les signes qui comptent. Mais c'est le physicien Hertz* qui va populariser en physique la doctrine des symboles de Helmholtz. Dans ses « Principes de la mécanique » il considère que nous utilisons des images comme représentation des choses sans qu'elles aient besoin pour remplir leur tâche d'aucune espèce de conformité avec les choses. Ce sont les relations entre les images d'objets qui sont des images des relations entre objets. Bien que les mots renvoient aux choses de façon arbitraire notre agencement des mots veut renvoyer à l'agencement des choses. Hertz était beaucoup plus satisfait par les équations mathématiques que par les images mécaniques. C'est d'ailleurs lui qui a donné aux équations de Maxwell* leur forme mathématique actuelle. Il y a entre la théorie de Helmholtz et celle de Hertz une différence fondamentale en ce que chez l'un les signes sont liés aux impressions sensuelles et chez l'autre sont de libres créations de l'esprit. Selon la distinction de Peirce* ce sont des signes* qui sont soit des indices soit des symboles.

Conception qui aura un grand retentissement à travers des philosophes comme Wittgenstein* ou Cassirer*. Ce dernier, dans la « Philosophie des formes symboliques » (1927) considère que nous forgeons des symboles* ou des simulacres* internes des objets extérieurs, d'une nature telle que les conséquences logiques de ces

symboles soient elles mêmes les images des conséquences nécessaires des objets naturels qu'ils reproduisent. Il y a là une pensée conventionnaliste* qui se trouve aussi développée par Duhem* et Poincaré*. Une pensée antiréaliste* et fictionnaliste* qui s'ouvre en fait sur un réalisme structural*. Les théories sont structurellement correctes sans pour autant être des miroirs des objets de la nature. Selon les termes de Poincaré : « ce qu'elle (la science) peut atteindre, ce ne sont pas les choses en elles mêmes, comme le pensent les dogmatistes naïfs, ce sont seulement les rapports entre les choses; en dehors de ces rapports il n'y a pas de réalité connaissable ».

Des idées qui ne sont pas étrangères au positivisme logique* et à son représentant éminent Rudolf Carnap* dans sa construction logique du monde.

Une pensée qui est aussi celle du grand mathématicien et physicien Hermann Weyl* qui ouvre la voie aux théories de champ de jauge* dans la théorie des champs*. Il est très voisin de Cassirer en privilégiant la forme symbolique sur la forme substantielle* (« Qu'est ce que la matière-1923-). « C'est par la liberté* dans l'action symbolique que l'esprit construit lui même en physique un cadre auquel il rapporte l'ensemble des phénomènes. Il n'a pas besoin pour cela d'éléments importés comme l'espace et le temps, et les particules de substance ; il tire toutes choses de lui même ». Les conceptions de Weyl vont régner sur la théorie quantique des champs* à travers son usage massif de la théorie des groupes* et des représentations géométriques.

La conception sémiotique de la physique et le réalisme structural* sont des courants influents de l'épistémologie de la physique contemporaine.

SYMETRIE

Un objet est symétrique lorsque l'on peut le modifier tout en gardant en définitive son aspect identique. La symétrie c'est l'invariance par rapport à certaines transformations mathématiques.

La symétrie inspire un sentiment d'ordre, d'harmonie*, de calme, de perfection, présente de nombreux avantages pratiques, mais n'est pas nécessairement un garant de beauté.

L'asymétrie (rupture de symétrie) est une condition d'apparition de la forme*. La symétrie est une propriété structurale générale alors que l'asymétrie est une propriété individuelle. Un monde totalement symétrique serait homogène, uniforme, monotone. Il n'y aurait rien à y voir, ni objets, ni phénomènes. Le vide*. Le monde existe grâce à

l'unité de la symétrie et de l'asymétrie dont le corps humain est un bon exemple.

La symétrie n'est pas une forme, mais elle sélectionne les formes et les conserve. Ainsi, il n'y a que 5 polyèdres réguliers (les cinq corps platoniciens), il n'y a que 17 familles de pavages du plan avec un motif, il n'y a que 48 types de remplissage du plan respectant la symétrie colorée- conservation de la forme avec permutation exacte des couleurs- pour deux couleurs.

Il existe de très nombreux types de symétrie, dont la symétrie par translation, la symétrie par réflexion, la symétrie par rotation, la symétrie par permutation (ex. symétrie colorée).

La définition de l'ensemble des transformations laissant invariantes toutes les relations structurelles de l'objet, c.a.d la définition du groupe* de ses automorphismes*, est devenu un principe directeur des mathématiques et de la physique contemporaines, permettant de révéler dans sa profondeur l'organisation de l'objet et de ses parties. En particulier la symétrie, en révélant les possibilités de mouvement liées à l'objet, loin d'être une simple caractéristique géométrique, se trouve profondément liée aux comportements dynamiques. C'est là la signification d'un des théorèmes les plus importants de la science de la nature sur le rapport entre symétrie et lois de conservation*, le théorème de Noether*, et des considérations de Pierre Curie sur les rapports entre les symétries des causes et les symétries des effets*.

La symétrie joue des rôles variés.

L'un des rôles joué par la symétrie est la classification, comme par exemple dans la classification des cristaux selon les 32 groupes de symétrie cristalline (symétrie en chimie*). On peut aussi citer la classification des particules élémentaires* à l'aide des représentations des groupes de symétrie physiques fondamentaux ;

La symétrie a un rôle normatif , en restreignant la forme des théories ou des équations fondamentales, en sélectionnant les formes.. En cherchant des équations pour la gravitation, Einstein à utilisé le principe général de covariance*.

La symétrie a un rôle unificateur, comme dans la description unifiée des forces fondamentales de la nature en terme des groupes de symétrie locaux*.

Tous ces rôles généraux ont souvent un caractère explicatif, dans la mesure où la symétrie conditionne la forme des lois ou l'apparition ou non de certains phénomènes comme dans le rapport entre la symétrie des causes et la symétrie des effets*. Sans parler de l'effet explicatif du rôle unificateur.

On peut se demander quel est le statut de la symétrie, ontologique* ou épistémique* ;

Selon le point de vue ontologique les symétries sont partie intégrante de la nature physique du monde, ce qui explique le succès de la notion de symétrie en physique. Ainsi en est-il lorsque l'on utilise la symétrie pour prédire l'existence de nouvelles particules, ce qui peut se produire lorsqu'il y a des places vacantes dans une classification, comme pour la particule oméga dans le contexte de la classification des hadrons*, mais peut aussi résulter des besoins d'unification, comme pour les particules W et Z dans la théorie de jauge* d'unification des interactions électromagnétiques et faibles.

Une autre incitation à considérer les symétries comme faisant partie de la nature est dans l'interprétation géométrique des symétries spatio-temporelles, considérées comme des structures* géométriques du monde physique. Une conception qui peut être étendue aux espaces internes*, mais avec cette différence que si les symétries spatio-temporelles sont directement observables, les symétries locales de la théorie de jauge* ne le sont pas.

Selon le point de vue épistémique l'emploi de la symétrie est un principe méthodologique qui pallie à notre méconnaissance profonde des lois de la nature*, à moins que cela ne soit une condition nécessaire de la connaissance selon le point de vue kantien. Une limitation de la connaissance, ainsi de la position absolue des objets qui n'est pas observable.

Sans privilégier aucun de ces deux points de vue on peut constater un lien étroit entre la symétrie et l'objectivité*. Ainsi nous considérons les lois d'évolution des systèmes physiques comme objectives car elles sont les mêmes pour tous les observateurs. Ce qui est objectif est invariant par rapport aux transformations des systèmes de référence, c.a.d. invariant par rapport au groupe des automorphismes* de l'espace temps.

Deux grands livres sur la symétrie ont marqué la culture du XX^e siècle : *On growth and form* de D'Arcy Wentworth Thompson* et *Symmetry* de Hermann Weyl*. La symétrie et les distorsions de symétrie jouent un rôle fondamental dans la classification et la compréhension de tous les phénomènes de la nature.

SYMETRIE (BRISURE SPONTANEE DE)

Situation d'un système physique qui se trouve dans un état de moindre symétrie que celle qui caractérise ses équations fondamentales de mouvement. Cela signifie que l'on considère une

solution de ces équations ayant une symétrie plus faible que les équations elles mêmes. Une solution qui ne réalise pas en quelque sorte toutes les possibilités des équations. Il y'a là violation du principe de Curie sur le rapport entre la symétrie des causes et la symétrie des effets*. La brisure spontanée de symétrie se produit lorsque l'état où la symétrie totale est respectée n'est pas un état d'énergie minimale et où il existe une série d'états d'énergie plus basse (la même pour tous), mais où chacun de ces états ne présente plus individuellement la symétrie totale. Celle ci n'apparaît que pour l'ensemble des états inférieurs, entre lesquels le système peut "passer" par transformation de symétrie.

La brisure de symétrie est une notion profondément liée aux formes et à leur apparition. Cet énoncé peut paraître contre intuitif car nombres de formes présentent de remarquables symétries, pourtant c'est bien dans de tels cas qu'il y a brisure de symétrie par rapport à la symétrie complète d'un état homogène (invariant par toute translation, rotation, réflexion, inversion et homothétie).

Un exemple concret d'état de la matière possédant une brisure spontanée de symétrie est l'état solide cristallin. Un cristal n'est en effet invariant que sous l'action d'un groupe de symétrie discret comprenant des translations discrètes, des réflexions et des rotations de 60° , 90° , 120° , 180° autour de plan ou d'axes particuliers, alors que l'équation de Schrödinger* qui décrit le mouvement des électrons et des noyaux qui constituent ce cristal est invariante sous n'importe quelle translation, rotation ou réflexion.

Les phénomènes de condensation impliquent une brisure spontanée de symétrie tout comme la cristallisation. C'est le cas par exemple de la condensation de Bose-Einstein*.

Les brisures de symétrie accompagnent les bifurcations* et les transitions de phase*. Expliquer les brisures de symétrie rejoint ainsi une des question centrale de la morphogénèse : rendre compte de l'apparition de motifs que rien dans les conditions initiales ou dans les conditions aux bords ne laisse pressentir ni ne contrôle. La forme à partir de l'informe.

On connaît de très nombreux exemples de brisure spontanée de symétrie et chacun d'eux constitue un phénomène physique remarquable: le ferromagnétisme*, la superfluidité*, la supraconductivité*.

Un exemple simple de brisure spontanée de symétrie est fourni par un ensemble d'atomes magnétiques dont l'énergie est minimale quand tous les moments magnétiques sont parallèles. La direction prise par ces moments peut être quelconque – il y a initialement

symétrie par rotation –, mais le système en choisit spontanément une, et l'état fondamental ainsi obtenu brise la symétrie de rotation. Y. Nambu a développé vers 1960 l'idée de brisure spontanée de symétrie dans la théorie bcs de la supraconductivité* proposée en 1956. C'est la symétrie dite de jauge* de l'électromagnétisme qui était en jeu, et sa brisure spontanée élucidait notamment l'existence d'un gap d'énergie électronique. Y. Nambu a ensuite proposé un mécanisme analogue en physique des particules. Notamment, il a conçu un modèle où la brisure spontanée d'une symétrie dite chirale expliquerait la masse du proton ou du neutron

En théorie quantique des champs* le mécanisme de la brisure spontanée de symétrie concerne l'état du vide de champs de jauge* et permet l'apparition d'un faux vide* dont les quanta sont porteurs de masse. C'est ce mécanisme qui a permis de formuler une théorie unitaire des interactions faible et électromagnétique (théorie électrofaible*). Ce sont des brisures spontanées de symétrie qui font que la matière domine sur l'antimatière* dans l'univers, ou que la nature a choisi pour certaines molécules comme les acides aminés ou les sucres certaines formes privilégiées de chiralité*

En embryologie* la nature réussit à briser la symétrie sphérique initiale de l'embryon, pour produire des animaux ayant deux axes bien distincts un axe antéro-postérieur et un axe dorso-ventral.

La symétrie est la propriété qui rassemble les contraires, de façon relativement peu stable, alors que la brisure de symétrie les oppose et produit une nouvelle stabilité. Dans certaines circonstances la symétrie s'avère instable* et la brisure de symétrie rétablit la stabilité*. Une grande partie de la structure du monde à la fois social et physique est une conséquence de la nécessité de briser les symétries présentes dans l'espace des possibles. L'utilisation de la brisure spontanée de symétrie dans les théories fondamentales de la matière a eu des conséquences essentielles non seulement sur les lois de la nature mais aussi sur la question plus globale de ce qu'est la nature. Avant cette époque on croyait que les caractéristiques des particules élémentaires étaient déterminées par des lois éternelles et immuables. Avec la théorie de la brisure de symétrie les caractéristiques des particules élémentaires dépendent en partie de l'histoire et de l'environnement. La symétrie peut être brisée en fonction de conditions comme la densité ou la température.

La brisure spontanée de symétrie est au cœur de l'explication contemporaine de l'apparition dynamique des formes*.

SYMETRIE CPT

SYMETRIE DE JAUGE (Cf. Symétrie locale*, Jauge* (invariance de))

SYMETRIE DES CAUSES ET SYMETRIE DES EFFETS

Pierre Curie a étudié les conditions liées à la symétrie d'un phénomène.

La symétrie caractéristique d'un phénomène est la symétrie maximale compatible avec l'existence du phénomène. Un phénomène peut exister dans un milieu qui possède sa symétrie caractéristique ou celle d'un des sous-groupes de sa symétrie caractéristique. Autrement dit, certains éléments de symétrie peuvent coexister avec certains phénomènes, mais ils ne sont pas nécessaires. Ce qui est nécessaire, c'est que certains éléments de symétrie n'existent pas. C'est la dissymétrie qui crée le phénomène... C'est une idée incontestablement profonde et même prémonitoire, car elle annonce l'importance que nous attachons aux défauts* et aux brisures de symétrie*

Il a énoncé deux principes :

Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. Mais les effets produits peuvent être plus symétriques que les causes.

A phenomenon can exist in a medium possessing its characteristic symmetry or that of one of its subgroups. What is needed for its occurrence (i.e. for something rather than nothing to happen) is not the presence, but rather the absence, of certain symmetries: "Asymmetry is what creates a phenomenon".

Lorsque certains effets révèlent une dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance.

Toutefois le principe de Curie ne s'applique sous cette forme simple que si l'effet considéré est unique. S'il n'en est pas ainsi un effet peut avoir moins de symétrie que sa cause, ainsi une solution particulière d'un problème peut avoir moins d'éléments de symétrie que les données de ce problème. Une généralisation de ce principe existe également pour les phénomènes physiques incluant une possibilité de bifurcation : pour une même cause, deux effets distincts physiquement et qui ne peuvent coexister sont possibles. Parfois, chacune des possibilités prise séparément est moins symétrique que la cause. Dans ce cas, c'est la symétrie globale de l'ensemble des effets qui

doit être prise en compte pour respecter le principe de Curie (exemple : domaines ferroélectriques de BaTiO_3 à basse température ou flambement d'une poutre en mécanique des structures).

La brisure spontanée de symétrie* viole le principe de Curie.

Mais la chose la plus profonde que Pierre Curie fut le premier à apercevoir, c'est que la symétrie de l'espace est modifiée par les actions physiques et, en particulier, que là où règne un champ électromagnétique, une portion d'espace change de symétrie.

Les conditions différentes de production d'un champ électrique, à partir d'une distribution de charges, et d'un champ magnétique, à partir d'un courant dans un circuit, font que ces deux champs n'ont pas les mêmes propriétés de symétrie. Ceci se traduit mathématiquement par le fait que le champ électrique est un vecteur* et que le champ magnétique n'en est pas un. Ce sont des tenseurs* de nature différente que l'on distingue parfois en les appelant vecteur axial et vecteur polaire.

Historically, the first explicit formulation of this kind of argument in terms of symmetry is due to the physicist Pierre Curie towards the end of nineteenth century. Curie was led to reflect on the question of the relationship between *physical properties* and *symmetry properties* of a physical system by his studies on the thermal, electric and magnetic properties of crystals, these properties being directly related to the structure, and hence the symmetry, of the crystals studied. More precisely, the question he addressed was the following: in a given physical medium (for example, a crystalline medium) having specified symmetry properties, which physical phenomena (for example, which electric and magnetic phenomena) are allowed to happen? His conclusions, systematically presented in his 1894 work "Sur la symétrie dans les phénomènes physiques" (see this volume, section III), can be synthesized as follows:

(a) A phenomenon can exist in a medium possessing its characteristic symmetry or that of one of its subgroups. What is needed for its occurrence (i.e. for something rather than nothing to happen) is not the presence, but rather the absence, of certain symmetries: "Asymmetry is what creates a phenomenon".

(b) The symmetry elements of the causes must be found in their effects, but the converse is not true; that is, the effects can be more symmetric than the causes.

Conclusion (a) clearly indicates that Curie recognized the important function played by the concept of symmetry breaking in physics (he was indeed one of the first to recognize it). Conclusion (b) is what is usually called "Curie's principle" in the literature, although notice that (a) and (b) are not independent of one another.

In order for Curie's principle to be applicable, various conditions need to be satisfied: the causal connection must be valid, the cause and effect must be well-defined, and the symmetries of both the cause and the effect must also be well-defined (this involves both the physical and the geometrical properties of the physical systems considered). Curie's principle then furnishes a *necessary condition* for given phenomena to happen: only those phenomena can happen that are compatible with the symmetry conditions established by the principle.

Curie's principle has thus an important methodological function: on the one side, it furnishes a kind of selection rule (given an initial situation with a specified symmetry, only certain phenomena are allowed to happen); on the other side, it offers a falsification criterion for physical theories (a violation of Curie's principle may indicate that

something is wrong in the physical description).¹¹

Such applications of Curie's principle depend, of course, on our accepting its validity, and this is something that has been questioned in the literature, especially in relation to spontaneous symmetry breaking (see this volume, section III). Different proposals have been offered for justifying the principle. We have presented it here as an example of symmetry considerations based on Leibniz's PSR, while Curie himself seems to have regarded it as a form of causality principle. Chalmers (1970) considers its relation to the invariance properties of physical laws and argues that the principle follows from these in the case of deterministic laws, a point of view taken up again and generalized in Ismael (1997). On this approach, Curie's principle is understood as a condition on the relationship between the symmetries of a problem (an equation) and its solution(s). This has the advantages of avoiding the apparent vagueness of Curie's formulation (the appeal to causality, and so forth) while also extending it to cover symmetries of physical laws. However, trying to generalize Curie's principle as a principle about the link between the symmetries of an equation and its solution(s) is not straightforward and requires further attention (for more on symmetries of laws versus symmetries of solutions, see Belot, this volume, and Castellani, this volume, section III).

3 Symmetries

SYMETRIE EN BIOLOGIE

SYMETRIE EN CHIMIE

SYMETRIE EN PHYSIQUE

Lorsque l'état d'un système ne change pas quand le système est soumis à une certaine transformation, on dit que le système est symétrique* par rapport à cette transformation. Toutes les transformations possibles de ce type, transformations de symétrie, forment un objet mathématique appelé groupe*.

La signification fondamentale de la symétrie en physique provient de ce qu'à chaque transformation continue de symétrie correspond une loi de conservation* d'une grandeur physique liée à cette symétrie. C'est là le célèbre théorème de Noether*. Ainsi l'existence même de quantités physiques conservées est conditionnée par des types définis de symétrie, ce qui veut dire que les grandeurs physiques apparaissent comme des générateurs de transformations.

Les physiciens cherchent à formuler des modèles qui soient indépendants du point de vue de l'observateur, afin de décrire une réalité objective. Noether* a montré que tout modèle qui ne dépend pas d'un moment spécifique dans le temps, d'une position particulière ou d'une direction préférentielle dans l'espace automatiquement conservera l'énergie, le moment linéaire et le moment angulaire. La mécanique classique découle ainsi d'une invariance de point de vue sur l'espace et le temps.. Lorsque l'invariance rotationnelle est étendue à

l'espace-temps*, on obtient l'invariance de Lorentz* et la relativité restreinte*.

Par ailleurs le principe fondamental de la théorie de jauge* des interactions fondamentales consiste en ce que les sources des champs de jauge* –transporteurs des interactions- s'avèrent des quantités définies conservées, jouant le rôle de « charges », ce qui se réalise du fait de l'existence de certaines symétries locales*, les symétries internes*. L'existence de telles symétries définit de manière univoque le comportement des champs de jauge*. C'est à dire que la symétrie des interactions définit totalement leur dynamique. Un point de vue qui apparaît aussi dans la théorie de la gravitation*. C'est pourquoi des considérations de symétrie se trouvent à la base des tentatives de formulation d'une théorie unitaire* de toutes les forces de la nature (Grande unification*).

L'étude des conséquences des symétries des états physiques a connu un renouveau florissant depuis l'avènement de la mécanique quantique en 1925. Mais il ne faut pas se contenter d'étudier les symétries des états physiques, il faut aussi étudier les symétries des lois* physiques. C'est ainsi que la théorie de la relativité tire parti de ce que les équations de Maxwell n'ont pas le même groupe de symétrie que celui de la mécanique newtonienne. Elle formule une dynamique relativiste pour résoudre cette incohérence, introduisant un groupe de symétrie dit groupe de Lorentz inhomogène ou groupe de Poincaré.

SYMETRIE ET MECANIQUE QUANTIQUE

La symétrie joue un rôle central en mécanique quantique, car la théorie des groupes* s'y invite naturellement à cause de l'appareil mathématique de la théorie quantique, exploitant toutes les ressources d'un espace vectoriel de fonctions. En particulier la théorie de la représentation des groupes trouve dans cet espace vectoriel et les opérateurs* (observables*) qui lui sont associés un support adapté, ce qui a été reconnu dès les débuts de la mécanique quantique par H. Weyl* et E. Wigner*. En présence d'un groupe de symétrie, les états d'un système se transforment entre eux selon une certaine représentation du groupe faisant intervenir des opérateurs agissant sur l'espace des états, qui se trouvent ici être les opérateurs associés aux observables physiques.

C'est ainsi que les opérateurs représentant les symétries d'un système commutent avec l'hamiltonien*, ils fournissent une représentation du groupe de symétrie dans l'espace des fonctions

d'onde correspondant à une même énergie, et correspondent à des quantités conservées. Les états du système peuvent être classés (repérés) à l'aide des représentations irréductibles du groupe de symétrie (nombres quantiques*). Cela est particulièrement utile en mécanique quantique des systèmes atomiques où se manifestent le groupe des rotations (symétrie sphérique des atomes) et le groupe des permutations (invariance par permutation des électrons).

SYMETRIE GLOBALE

Symétrie concernant l'ensemble d'un objet, c.a.d. identique en tous les points de cet objet dans l'espace temps.

SYMETRIE INTERNE

En théorie quantique, symétrie d'un système physique, liée non pas à la transformation des coordonnées d'espace temps, mais aux transformations dans l'espace des états (espace de Hilbert abstrait). On dit que l'on considère l'espace interne* du système par opposition à l'espace temps physique. C'est l'espace intérieur de la Boîte Noire* Quantique.

En vertu du théorème de Noether* une loi de conservation d'une grandeur physique correspond à l'existence d'une symétrie dans l'espace où cette grandeur est définie.

Ainsi la conservation du spin*, du spin isotopique*, de la parité interne*, de la charge baryonique* ou de l'étrangeté* pour les hadrons correspondent à des symétries internes.

Les invariances de jauge* sont des symétries internes.

SYMETRIE LOCALE

Propriété de symétrie variable d'un point à un autre d'un objet. C'est le cas de la symétrie de jauge*.

Cette notion de symétrie locale a été introduite par Hermann Weyl* en 1918 dans le cadre de la gravitation et en 1929 il comprit que l'électromagnétisme pouvait être envisagé comme la réalisation d'une telle symétrie.

SYMETRIE MIROIR

SYMPLECTIQUE (STRUCTURE. GEOMETRIE)

La géométrie symplectique, sous son ancien nom « théorie des transformations canoniques », a été profondément renouvelée récemment et sert de langage commun à de nombreuses théories de la physique.

Un espace vectoriel est dit symplectique si l'on a défini sur lui une forme linéaire antisymétrique, c.a.d. si à deux vecteurs on sait faire correspondre un nombre par une formule telle que le changement de l'ordre des vecteurs donne le nombre opposé. Par exemple dans un espace vectoriel de dimension 2, pour deux vecteurs u_1 et u_2 , de composantes (q_1, p_1) et (q_2, p_2) , la forme est définie par $[u_1, u_2] = q_1 p_2 - q_2 p_1$. Une variété* symplectique est une variété qui a localement la structure d'un espace vectoriel symplectique. Un difféomorphisme symplectique, transformation canonique, est une transformation continue localement symplectique. La géométrie symplectique est l'étude des variétés et des difféomorphismes symplectiques.

La relation avec la physique provient de ce que l'espace de phase d'un système mécanique est une variété symplectique et que l'évolution temporelle d'un système mécanique conservatif est une famille à un paramètre de difféomorphismes symplectiques. Cette structure de la mécanique classique* est apparue dans la mécanique hamiltonienne*. En fait chez Hamilton* c'est d'abord l'optique géométrique* qui a été réduite à une géométrie symplectique. Ce n'est que quelques années plus tard qu'il se rendit compte que ces méthodes s'appliquaient aussi à la mécanique. L'analogie* entre l'optique et la mécanique a servi cent ans plus tard dans l'élaboration de la mécanique quantique*.

La raison pour laquelle la géométrie naturelle de la mécanique classique n'est pas la géométrie euclidienne est que les droites ne sont pas conservées lors de l'évolution d'un système mécanique.

La géométrie symplectique s'inscrit dans une longue histoire de la géométrie différentielle*.

L'introduction du calcul vectoriel* de Heaviside en 1882, manipulation géométriques des vecteurs, a non seulement simplifié les calculs mais aussi provoqué une nouvelle conception des lois physiques. Il a joué un rôle considérable dans la présentation de l'électrodynamique classique et la compréhension des équations de Maxwell.

Dans cet esprit, la géométrie différentielle* sans coordonnées d'Elie Cartan* dans les années 30, a eu un effet encore plus profond sur l'expression et la structure conceptuelle de la physique.

Les coordonnées* ne sont pas physiques et ces formulations géométriques encouragent l'utilisation de concepts ayant une interprétation physique.

Dans les années 60, on a découvert que, de la même manière que la géométrie de Riemann* décrit la structure de l'espace-temps, la géométrie symplectique décrit la structure de l'espace de phase* d'un système hamiltonien*. Cette reformulation de la mécanique hamiltonienne* a eu dans les années 70- 80 un impact profond sur la physique. De très nombreux domaines ont reçu une formulation hamiltonienne.

Un des défenseurs de ce « tout symplectique », le mathématicien russe Arnold, va jusqu'à envisager une mathématique symplectique. Chaque domaine des mathématiques doit finalement révéler la symplectisation.

Cette mathématique symplectique joue un rôle fondamental dans l'étude de l'intégrabilité* des équations différentielles. On peut chercher à établir un lien entre l'intégrabilité d'un système hamiltonien* et la topologie de son espace de phase.

Il y'a là un exemple admirable d'unité* de la physique autour d'un modèle universel de système fermé*, le système hamiltonien*.

SYNCHRONICITE

SYNCHRONIE

SYNCHRONISATION

SYNCHRONISATION (des oscillateurs)

Etablissement et maintien d'un régime commun d'oscillation entre deux où plusieurs auto-oscillateurs* faiblement liés les forçant à adopter des fréquences communes ou liées de façon rationnelle. C'est l'ajustement du rythme des oscillations de deux systèmes faiblement liés.

On parle de verrouillage de fréquence. Dans ce phénomène il se produit aussi l'apparition d'une relation entre les phases des deux systèmes oscillants et l'on parle de verrouillage de phase, avec la possibilité d'une synchronisation en phase ou d'une synchronisation en anti-phase.

La synchronisation peut s'effectuer avec apparition d'une nouvelle fréquence commune différente des fréquences initiales ou par

entraînement lorsque l'un des oscillateurs impose sa fréquence à l'autre.

Il faut clairement distinguer la synchronisation entre auto-oscillateurs et le phénomène de résonance* où un pendule entre en oscillation sous l'effet d'une force périodique (la balançoire). Le pendule n'est pas un auto-oscillateur et ne peut osciller indéfiniment, il s'amortit sous l'effet du frottement.

Le phénomène a été établi pour la première fois par Huygens* au XVII^e siècle sur des horloges pendues ou placées sur un même support, rendant leurs oscillations parfaitement égales tout en se trouvant en opposition de phase. Artifice utilisés par les marchands d'horloges pour laisser penser que toutes leurs horloges marquent la même heure.

Ce phénomène a pris une grande importance et a été étudié théoriquement avec l'avènement des techniques électriques et radiophysiques*. C'est ainsi que Van der Pol* et Appleton ont étudié la synchronisation d'un générateur radio par un signal extérieur faible de fréquence légèrement différente. Il est apparu que de très nombreux phénomènes de la physique ou de la biologie, de la technique ou de la vie sociale, relevaient d'une même théorie de la synchronisation établie dans le cadre de la dynamique non-linéaire*. C'est le cas pour l'accord entre les différents tuyaux d'orgues, pour l'unisson du chant des criquets ou des cigales, pour les émissions lumineuses d'un ensemble de lucioles, pour le fonctionnement d'un pacemaker cardiaque, pour l'excitation d'assemblées de neurones ou la coordination des applaudissements dans une salle de spectacle.

Les applications de la synchronisation sont extrêmement nombreuses. Ainsi la synchronisation permet à un générateur de courant alternatif, à un moteur synchrone ou à différents dispositifs non-linéaires d'acquiescer

SYNCHROTRON

SYNECDOQUE

Emploi d'un mot en un sens dont son sens habituel n'est qu'une des parties ou un tout englobant..

Parler d'un "être humain" pour désigner un individu précis.
Dire cent voiles pour désigner cent bateaux.

SYNERGETIQUE

Tout comme la cybernétique* des années 50, la synergétique est un nom donné à une science carrefour des années 70, définie aussi comme « culture non linéaire* » ou « néo-mécanisme* ».

A strictement parler le terme de « synergétique » a été proposé par Hermann Haken* pour désigner un courant interdisciplinaire, né de ses travaux sur la théorie du laser* et sur les transitions de phase de non équilibre*. Ce terme souligne le rôle principal joué là par les interactions coopératives responsables de l'apparition et du maintien de l'autoorganisation* dans différents systèmes ouverts*.

Haken a été un des premiers à attirer l'attention sur l'analogie profonde entre le processus de naissance de la lumière cohérente du laser et les processus accompagnant les processus de transition de phase* de seconde espèce, ainsi que l'attention sur l'analogie des équations de la théorie du laser avec les équations de la supraconductivité*.

Haken voulait par la synergétique créer une science générale des phénomènes collectifs d'autoorganisation*. Il se trouve qu'historiquement ce courant d'idées est apparu au même moment où l'école de Bruxelles (Prigogine*) formulait ses idées sur la thermodynamique de non équilibre* et les structures dissipatives*, et que simultanément sont apparus au grand jour les travaux de l'école soviétique des systèmes dynamiques*. Sans parler de la théorie des catastrophes de Thom*, qui étudie le comportement de systèmes auto-organisés en terme de bifurcations*, d'attracteurs* et de stabilité*.

La révolution non linéaire était en marche, avec l'apparition d'une culture non-linéaire*. Certains ont trouvé commode de l'affubler globalement du nom de synergétique, au lieu de thermodynamique de non équilibre* non linéaire, de théorie de l'auto-organisation*, ou même théorie des autoondulations*. La dénomination a assuré le succès de ces théories dans la culture scientifique contemporaine.

Dans la synergétique la synergie* n'est pas conçue comme un paradigme anthropologique. Haken lui-même décrit la synergétique par des formules générales comme « science de la coopération » « étude des lois générales des systèmes à nombreuses parties séparées ». Théorie générale des systèmes* elle décrit des phénomènes aussi divers que les structures dissipatives*, l'auto-organisation*, les fractals* ou la complexité*. Toutes sortes de phénomènes ou de théories impliquant une certaine forme de synergie, toutes sortes de processus impliquant une cohérence* ou une collaboration. En fait la synergétique concerne des phénomènes se produisant dans des

systèmes non-linéaires* ouverts* loin de l'équilibre, et cherche tout comme Prigogine* à en formuler une théorie générale.

SYNERGIE (Cf. Synergétique*, Holisme*)

Du grec syn-ensemble et ergos-action.

Effet total de deux ou plusieurs facteurs en interaction, caractérisé par le fait, que l'action dépasse largement la simple somme des actions de chaque élément constituant. C'est en fait la définition de la non-linéarité*.

SYNTAGME

Dans la partie syntaxique de la sémiotique*, combinaison de signes en interaction formant un tout signifiant. Ces combinaisons sont formées selon des règles syntaxiques. En linguistique une phrase est un syntagme, tout comme les paragraphes ou les chapitres. Les relations syntagmatiques sont les différentes façons dont les éléments d'un même texte peuvent être reliés les uns aux autres. L'examen d'un texte selon le point de vue syntagmatique est considéré comme un déplacement le long de « l'axe syntagmatique ».

SYSTEME

Terme utilisé pour signifier que l'on développe une conception totalisante d'un objet de la nature (système physique, système biologique...) associée à un modèle théorique. On désigne ainsi tout assemblage d'êtres possédant une réalité physique, objets inanimés ou êtres vivants, ou une réalité abstraite, liés de certaine façon entre eux et susceptibles d'être discernés des éléments qui ne font pas partie du système, tout comme les éléments d'un ensemble* peuvent être distingués des éléments extérieurs au moyen d'une règle d'appartenance. Il n'est pas toujours clair si un ensemble d'éléments fait système. Cette définition d'un système comme ensemble d'éléments en interaction peut sembler si générale et vague qu'elle ne soit pas productive. Il n'en est rien. C'est ce qu'a tenté de montrer la théorie générale des systèmes*. La notion de système, à la mode depuis la cybernétique* n'est cependant pas nouvelle, l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert comportait un article Système de 45 pages. Il accumulait les présentations des systèmes métaphysiques et théologiques, des systèmes d'astronomie, des systèmes mécaniques, des systèmes anatomiques, des systèmes poétiques et fabuleux, des systèmes mythologiques, des systèmes de fortification et des systèmes

harmoniques de notation musicale. La notion de système a toujours regroupé des objets et des concepts qui fonctionnent ensemble.

Dans son « *Traité des systèmes* » (1749) Condillac* donne la définition suivante : « *un système n'est autre chose que la disposition des différentes parties d'un art ou d'une science dans un ordre où elle se soutiennent toutes mutuellement, et où les derniers s'expliquent par les premiers* »

Deux points de vue théoriques peuvent être utilisés, un point de vue dynamique et un point de vue fonctionnel.

Le point de vue dynamique suppose que l'on peut définir pour le système la notion de son évolution temporelle. On parle de système dynamique*, lorsque cette évolution temporelle peut être décrite au moyen de la notion d'état* qui globalise à chaque instant toute l'information que l'on possède sur le système. Le présent du système quel que soit l'instant contient la totalité de son histoire. Non seulement le système dynamique est fatal, puisque tout découle de la connaissance d'un seul état mais encore cet état est quelconque. Le système est perpétuellement vierge et renaissant. On utilise un modèle différentiel. Mais il existe des systèmes évolutifs à mémoire, les systèmes héréditaires*, que l'on décrit par des modèles intégral-différentiels.

Le point de vue fonctionnel envisage le système comme faisant partie d'un ensemble au sein duquel on peut envisager des actions sur le système et des effets de ces actions sur l'ensemble. C'est le point de vue cybernétique* qui ne s'intéresse qu'aux entrées et aux sorties, tout en essayant d'établir une relation entre elles, ce qui peut aussi faire intervenir la notion d'état*. Le système est considéré comme le siège d'une transformation de l'information* qui se traduit mathématiquement par des relations intégrales (calcul symbolique, transformation de Fourier*, transformation de Laplace*...)

L'étude du lien entre le modèle différentiel et le modèle cybernétique est un des objectifs les plus importants de l'étude de tout système dynamique ouvert* complexe.

Dans « *Esquisse d'une sémiophysique* » René Thom fait justement écho à cette problématique :

« Le problème de trouver une liaison entre le formalisme cybernétique et le formalisme différentiel de la dynamique devrait être (à nos yeux) la tâche essentielle d'une Philosophie Naturelle.....Mais la causalité s'exprime difficilement en formalisme dynamique, parce que la dynamique ne traite exactement que des systèmes isolés, alors que l'essence du diagramme cybernétique est de traiter les actions d'un système sur un autre.... ».

La notion de système est effectivement plus générale que celle d'un système distingué de son environnement. Celui-ci fait souvent partie du système comme dans le cas des systèmes ouverts*.

SYSTEME AUTONOME (Cf. Autonomie*)

SYSTEME BIOLOGIQUE (Cf. Biologie systémique*)

Système complexe possédant un certain nombre de caractéristiques spécifiques de la vie : la faculté de croître, de se multiplier, de réagir à des actions extérieures et de se modifier. La vie* dans les systèmes biologiques s'accomplit par des échanges de matière et d'énergie, par des groupes de processus physico-chimiques complexes, par des réactions chimiques de synthèse et de dégradation à caractère cyclique et fermentatif. Les systèmes biologiques sont des systèmes ouverts* qui reçoivent de la matière et de l'énergie du milieu extérieur et l'utilisent pour la formation de structures plus complexes et organisées que ce milieu. Ils ont la capacité de recevoir, conserver et transformer l'information* et d'élaborer des réactions de contrôle complexes.

Une des principales propriétés des systèmes biologiques est la complexité structurale et fonctionnelle. Ils manifestent un caractère dynamique tant au niveau de l'ontogénèse* dans le développement et l'apprentissage* qu'au niveau phylogénétique* dans l'hérédité* et l'évolution*. Les systèmes biologiques sont caractérisés par une non homogénéité qualitative, présentant la coexistence de sous systèmes de natures très différentes coopérant au fonctionnement de l'ensemble. Ces différents sous systèmes présentent des constantes de temps souvent fort variées. Ainsi se manifestent des processus lents, biochimiques ou hormonaux, des processus rapides, les processus nerveux, et des processus super rapides, comme ceux de la perception ou de la pensée.

La complexité structurale et fonctionnelle se manifeste de manière hiérarchisée, avec complexification progressive à chaque niveau et transition qualitative brusque d'un niveau à l'autre. L'interaction des systèmes biologiques avec le milieu, leur adaptation* au milieu et leur évolution met en action des processus opposés d'organisation* et de stochasticité, d'ordre* et de désordre*. Cette dialectique assure les différents types de stabilité présents dans les systèmes biologiques, en particulier la stabilité structurelle* garante de la stabilité des formes vivantes.

SYSTEME CHROMATIQUE

SYSTEME COMPLEXE

Un système est complexe si le comportement collectif observé à l'échelle du système est plus riche que le comportement des éléments qui le composent à l'échelle inférieure. Il faut prendre en compte les différentes échelles présentes dans un système complexe. Une caractérisation essentielle des systèmes complexes, apparaissant dans leur définition même, est en effet l'existence de différents niveaux*, s'échelonnant depuis l'échelle microscopique des individus et des règles régissant leur comportement, jusqu'à l'échelle macroscopique, globale, ou s'effectue l'observation du système complexe dans son ensemble. Un système complexe est dominé par les phénomènes d'émergence*.

SYSTEME CONSERVATIF

Système dynamique* ou l'énergie totale est conservée, à la différence d'un système dissipatif*. C'est un système hamiltonien*. Le volume de phase γ est conservé (théorème de Liouville).

SYSTEME DEFERLANT

SYSTEME DISSIPATIF

Système dynamique* où l'énergie d'un processus ordonné se transforme en l'énergie d'un processus désordonné, en définitive en chaleur*. C'est la prise en compte de ce que l'énergie mécanique peut se transformer en une énergie non mécanique, calorifique ou lumineuse. Les systèmes dissipatifs s'opposent aux systèmes conservatifs* et s'en distinguent par le comportement de leur flot de phase qui ne conserve pas le volume de phase. Du point de vue de la théorie qualitative des systèmes dynamiques* c'est ce qui leur confère des propriétés particulières, en particulier la présence possible d'attracteurs*.

Les systèmes dissipatifs les plus courants où l'énergie se transforme en chaleur sont ceux où s'exerce un frottement*.

SYSTEME DISTRIBUE

Système dont les propriétés ne dépendent pas uniquement du temps mais aussi des coordonnées d'espace. L'évolution d'un tel système se traduit par des équations aux dérivées partielles*.

SYSTEME D'UNITES

SYSTEMES DYNAMIQUES (THEORIE DES)

On appelle système dynamique tout objet ou processus pour lequel on peut définir la notion d'état*, comme caractérisation instantanée, et dont l'évolution* est déterminée comme passage d'un état à un autre (trajectoire* dans l'espace de phase*). Un système dynamique est un système évolutif où le présent abolit le passé et détermine le futur. Le présent quel que soit l'instant contient la totalité de son histoire. C'est la situation que l'on retrouve en théorie des probabilités dans les processus aléatoires markoviens*. Ce type de modèle s'est avéré d'une immense fécondité puisqu'il a dominé la totalité de l'acquis scientifique des derniers siècles ; il est une généralisation de la notion de systèmes d'équations différentielles par rapport à une variable (le temps). On ne doit cependant jamais perdre de vue que d'autres systèmes évolutifs existent, où l'évolution dépend du passé, les systèmes héréditaires*.

On englobe ainsi des systèmes mécaniques, physiques, chimiques, biologiques, socio-économiques, des processus de calcul, de contrôle et de régulation, et en général tout processus de transformation de l'information qui s'effectue selon un algorithme*. Ceci comprend des systèmes réguliers ou aléatoires décrits par des équations différentielles* ou bien des systèmes comme les automates et les machines discrètes qui hantent l'informatique.

L'étude des systèmes dynamiques est une généralisation de la Mécanique Classique, fondée sur la théorie des équations différentielles* et la théorie des oscillations*, dont les appareils mathématiques ont été profondément renouvelés par les travaux de Henri Poincaré* et d'Alexandre Lyapounov*. (Cf. Théorie qualitative des systèmes dynamiques*). Le fait marquant de cette nouvelle théorie des systèmes dynamiques est la mise en évidence du comportement appelé "chaos déterministe*".

Il existe principalement deux modèles mathématiques :

Le portrait de phase géométrique, ensemble des trajectoires dans l'espace de phase* (espace des états*). Dans ce

modèle à un état d'équilibre correspond un point, à un mouvement périodique une courbe fermée.

Le système dynamique comme système de transformation de l'information : on considère les parties du système et l'on étudie l'évolution comme résultant des transformations des parties interagissantes avec souvent un caractère de finalité*, s'appuyant sur une formulation variationnelle, donnant à l'évolution l'aspect d'un processus contrôlé. Quoique cette approche ne donne pas une image du comportement dynamique aussi exhaustive que le portrait de phase, elle est essentielle, car le type de comportement dynamique d'un système (stabilité*, instabilité*, synchronicité*, chaos*) est lié aux interactions structurelles des parties constituantes.

Les progrès dans l'étude du comportement complexe des systèmes dynamiques, en particulier en ce qui concerne l'apparition du chaos déterministe*, sont liés à la formulation récente de théories de la complexité* des fonctions et des objets individuels. Cette complexité se formule comme la quantité d'information nécessaire pour reconstituer l'objet ou comme la longueur de l'algorithme* nécessaire pour le spécifier. Donner à ces concepts un contenu précis nécessaire pour reconstituer l'objet est le but de théories fondées sur des idées initialement formulées par Kolmogorov* : la théorie de l'entropie* de Kolmogorov-Sinai* des systèmes dynamiques et la théorie algorithmique de l'information*. Ces théories ont en commun de chercher à formuler la notion d'information de façon dynamique sans avoir recours au calcul des probabilités*, de manière à ce que ce concept soit applicable à des objets individuels. Se passer des probabilités pour éventuellement leur donner un fondement telle est aussi la démarche de la théorie des fonctions pseudo-aléatoires* de Bass. La complexité sera caractérisée par le comportement de la fonction de corrélation temporelle. Sa décroissance vers zéro à l'infini, c.a.d. une perte de mémoire due à la trop grande complexité, sera le signe d'une fonction chaotique.

Equipés de critères précis permettant de caractériser les phénomènes chaotiques, reste à montrer que ces phénomènes apparaissent réellement dans le cadre mathématique des théories déterministes existantes. En bref, les équations de la physique mathématique* admettent-elles des solutions chaotiques ou pseudo-aléatoire ?

Prouver cela de manière exacte est un problème formidable et l'apport du calcul numérique est délicat à évaluer à causes des erreurs de calcul.

On n'a obtenu en fait que deux résultats majeurs :

- 1) le théorème de Kolmogorov-Arnold-Moser (KAM), qui dit en gros qu'une petite perturbation d'un système dynamique hamiltonien* conservatif et intégrable* (et donc non chaotique) ne modifie que très peu la plupart des trajectoires .
Ceci a pour conséquence que la plupart des systèmes hamiltoniens ont un comportement régulier. On pourrait penser que cela interdit de trouver parmi les systèmes hamiltoniens des systèmes présentant des caractéristiques statistiques. De fait, c'est en cherchant à trouver un comportement chaotique dans certains systèmes non-linéaires que l'on a trouvé un certain nombre de systèmes intégrables (chaîne de Toda*, soliton*).
- 2) Un système hamiltonien comme un billard* à frontières concaves (billards de Sinai), dont la frontière est incurvée partout vers l'intérieur, constitue un exemple historique de système dynamique à propriétés stochastiques (chaotiques) fortes : ce sont des K-systèmes*.

SYSTEMES DYNAMIQUES (THEORIE QUALITATIVE DES)

Inaugurée par Poincaré* la théorie qualitative des systèmes dynamiques est l'étude des caractéristiques globales des trajectoires dans l'espace des états (espace de phase*). Il s'agit non pas tant de la détermination précise des trajectoires mais de leur classification selon des caractéristiques morphologiques.

On s'intéresse d'ailleurs souvent au comportement d'ensemble de trajectoires voisines (flot de phase), pour lesquelles dans le cas d'un système sans dissipation*(système hamiltonien*) on peut démontrer le théorème de Liouville : le flot de phase conserve le volume. Comme ce flot de phase évoque un liquide qui coulerait selon les trajectoires, ceci signifie que l'espace de phase en tant que liquide s'écoule au cours du mouvement en se déformant mais sans se comprimer ni se dilater nulle part.

Le problème mathématique général est dans la description du type possible de trajectoires. Le principe le plus simple d'une telle description consiste à classer les trajectoires en trajectoires périodiques ou fermées et en trajectoires non périodiques. Les trajectoires périodiques sont considérées comme les mouvements les

plus « réguliers », tels les mouvements des planètes autour du soleil ou le balancement du pendule.

Si une trajectoire est non périodique, elle peut être quasi-périodique, c.a.d. que bien que la trajectoire ne soit pas fermée, au bout d'un certain temps(la quasi-période) elle se rapproche d'une partie déjà parcourue de la trajectoire ;

On peut aussi s'intéresser au degré d'occupation de l'espace de phase par les trajectoires.

On dit qu'une trajectoire est partout dense si elle ne laisse aucun espace vide, c .a. qu'il n'existe aucun domaine si petit soit il qu'elle ne traverse jamais (sauf si le domaine est de mesure nulle réduit à un point). Une trajectoire périodique ne peut être partout dense.

Il existe des propriétés plus fortes que d'être partout dense, comme l'équidistribution* et la propriété générale d'ergodicité* qui joue un rôle important en mathématique, en mécanique et en physique statistique.

L'ergodicité signifie que la trajectoire séjourne dans un domaine mesurable durant un temps proportionnel au volume de ce domaine. Si ceci est vrai pour une trajectoire typique on dit que le système est ergodique. L'ergodicité peut en fait s'exprimer comme le fait que lors du mouvement un volume de l'espace de phase se déforme sans jamais reprendre sa forme initiale. Dans un système ergodique les trajectoires remplissent l'espace de manière partout dense et uniformément. Un petit volume de phase occupe successivement tout l'espace en restant peu déformé, comme toujours corrélé à lui même.

Un système ergodique présente une propriété fondamentale, le théorème de Birkhoff-Khinchin : la « moyenne temporelle » le long d'une trajectoire d'une fonction sur l'espace de phase est égale à la « moyenne spatiale » prise sur un ensemble de trajectoires. Cette propriété est utilisée lors de l'étude de toute une série de modèles de la physique mathématique contemporaine. Pendant longtemps, à partir de la fin du siècle dernier il y a eu une hypothèse due à Boltzmann* selon laquelle toutes les lois de la physique statistique pourraient être déduites du théorème ergodique. Il est aujourd'hui clair que cela n'est pas vrai, et que l'on doit au moins invoquer des propriétés plus fortes de stochasticité comme le mélange. Les points d'une trajectoire ergodique ne sont pas des ensembles aléatoires* ou pseudo aléatoires*, mais des ensembles quasi-aléatoires* suffisants pour des simulacres de Monte-Carlo*.

Le mélange* est une propriété plus forte que l'ergodicité. Il implique que la trajectoire est ergodique et « perd la mémoire » de son déroulement. La fonction d'auto corrélation temporelle tend vers

zéro lorsque le temps tend vers l'infini. La trajectoire devient une fonction pseudo-aléatoire*. C'est la propriété minimale assurant un degré de stochasticité suffisant pour la vérification de propriétés statistiques, c.a.d. assurant l'applicabilité des lois de la théorie des probabilités, par l'apparition de la propriété d'indépendance. En effet la propriété de mélange implique que la mesure de l'intersection d'un ensemble en mouvement avec un ensemble fixe tend vers le produit des mesures. Un petit volume de phase se déforme au point d'occuper finalement tout l'espace, tout comme une goutte d'encre dans l'eau finit par colorer tout le liquide, d'où le nom de mélange, exprimant la décorrélation avec le volume initial.

On peut définir des propriétés de mélange encore plus forte où l'indépendance concerne de plus en plus d'évènements. Enfin une propriété encore plus forte, la propriété K (Kolmogorov) apparaît lorsqu'il y a « presque » indépendance entre le présent et tout ce qui peut se produire dans un futur lointain. Ces manifestations de plus en plus forte de la propriété d'indépendance a pour effet de soumettre encore plus l'évolution des systèmes correspondants aux lois de la théorie des probabilités.

Un des résultats historiques de la théorie qualitative des systèmes dynamiques a été la démonstration par le mathématicien russe Sinäï (1970) de la propriété K pour la boule d'un billard plan à bords incurvés vers l'intérieur. Cette démonstration très délicate a fait admettre définitivement les propriétés de mélange comme responsables de l'apparition du « chaos déterministe* ».

Parmi les autres propriétés intéressantes des trajectoires dans l'espace de phase notons l'existence d'attracteurs* et la stabilité structurelle*

SYSTEME DYNAMIQUE (Le point de vue du raton laveur*)

Pour situer en quelques mots la théorie des systèmes dynamiques, disons que c'est une version moderne de la mécanique où selon la démarche générale de Poincaré on porte son attention non pas sur la forme précise de la trajectoire du mouvement mais sur tout un ensemble de propriétés qualitatives de cette trajectoire, qui ne se manifestent bien souvent que de manière asymptotique (c .a. d. lorsque l'on envisage le mouvement sur une durée infinie). Les questions que l'on se pose alors sont très différentes de savoir simplement quelle est la forme précise de la trajectoire au voisinage d'un point, mais plutôt de savoir combien de fois la trajectoire repassera au voisinage d'un point donné ou quelles sont certaines caractéristiques morphologiques

globales de la trajectoire dans son ensemble. Ces deux types de questions dépendent de méthodes mathématiques tout à fait différentes.

Illustrons cela sur l'exemple d'un système dynamique particulièrement simple mais qui s'avère d'une grande richesse mathématique : le billard* mathématique. C'est le résultat d'une forte abstraction à partir du jeu original réel. Des éléments matériels de ce jeu on ne retient que la table sans trous, et une boule unique que l'on remplace pour simplifier par une particule ponctuelle.

De cette manière on ne fait pas entrer en ligne de compte la rotation de la boule et le frottement* sur le tapis, et de ce fait la boule (particule) se déplace sur la table sans arrêts et sans freinage. Le mouvement n'est dirigé que par les réflexions élastiques (c.a.d. selon la loi « angle de réflexion égale angle d'incidence ») sur les bords de la table. La vitesse reste constante en valeur absolue tout en changeant de direction. La table peut avoir une forme quelconque parfois très complexe et bizarre, avec des bords courbes et sinueux, avec des trous et des compartiments.

On appelle configuration la position géométrique de la boule sans tenir compte de sa vitesse. L'espace de configuration c'est l'ensemble de toutes les configurations.

L'état* du système (ou sa phase) c'est la position géométrique avec la donnée de la vitesse. L'espace de phase* c'est l'ensemble de toutes les phases (états) possibles du système. Dans les systèmes déterministes*, auxquels appartient le billard, l'état à chaque instant définit complètement (univoquement) l'évolution dans le futur et l'histoire dans le passé. On comprend alors que c'est dans l'espace de phase que doivent être étudiés les systèmes dynamiques, en y considérant leurs trajectoires temporelles qui décrivent comment les points de phase passent de l'un à l'autre avec le temps. Le mouvement provoque une transformation de l'espace de phase en lui même, c'est à dire crée un mouvement de l'espace de phase qui se met à couler le long de ses trajectoires (flot de phase). Pour les modèles sans frottement, comme en mécanique classique, et c'est le cas du billard, le flot de phase conserve le volume (théorème de Liouville). Ceci signifie que l'espace de phase en tant que liquide qui s'écoule ne se comprime ni ne se dilate nulle part.

Le caractère constant de la vitesse dans le billard fait que de nombreuses propriétés qualitatives dans l'espace de phase se conservent dans l'espace de configuration Q , et c'est ce que nous sous

entendrons en énonçant les propriétés des trajectoires des différents types de billard. Il s'ensuit que ces propriétés sont aussi celles de suites arithmétiques générales, dont le billard fournit un modèle .

Le problème mathématique général du billard est dans la description des types possibles de trajectoires dans le domaine Q . Le principe le plus simple d'une telle description consiste à classer les trajectoires en trajectoires périodiques ou fermées et en trajectoires non périodiques.

Une trajectoire sera dite périodique ou fermée si au bout d'un certain temps (au bout d'une période) un point retourne à sa position initiale. Les mouvements périodiques sont considérés comme les mouvements les plus réguliers, comme les mouvements des planètes autour du soleil ou le balancement du pendule.

Pour les trajectoires périodiques on peut se demander s'il en existe dans un domaine Q donné et si oui quel est le critère de périodicité, c.a.d. peut on reconnaître une trajectoire périodique par la donnée d'une condition initiale. Ainsi pour un domaine carré, une trajectoire non singulière (ne passant pas par un sommet du carré) sera périodique si et seulement si le nombre $k = \tan \alpha$ (où α

est l'angle d'inclinaison de la trajectoire initiale par rapport aux côtés du carré) est rationnel. Autant chercher une aiguille dans une botte de foin.

Que se passe -t-il lorsque k est irrationnel ?. Le cas le plus fréquent . Les nombres irrationnels sont typiques et les nombres rationnels exceptionnels. La trajectoire n'est pas périodique, mais elle peut être quasipériodique, c.a.d. que bien que la trajectoire ne soit pas fermée, au bout d'un certain temps (la quasipériode) elle se rapproche d'une portion de trajectoire déjà parcourue. Un résultat remarquable est que pour un billard rectangulaire, comme d'ailleurs pour un billard circulaire ou un billard équilatéral toute trajectoire non périodique est nécessairement quasipériodique. Le billard mathématique peut servir à reconnaître le caractère rationnel ou irrationnel d'un nombre !!!!!

Une autre question se pose concernant le degré d'occupation du domaine Q par les trajectoires. On dit qu'une trajectoire est partout dense si elle ne laisse aucun espace vide, c.a.d. s'il n'existe aucun domaine si petit soit -il qu'elle ne traverse jamais (sauf si le domaine est de mesure nulle, réduit à un point). Une trajectoire périodique ne peut être partout dense même si elle remplit le domaine d'une manière dense. Une trajectoire non périodique n'est pas nécessairement

partout dense. Elle est cependant partout dense pour un billard rectangulaire ou triangulaire régulier.

Les trajectoires du billard peuvent avoir des propriétés plus fortes que partout dense, comme l'équidistribution dans le domaine ou la propriété plus générale d'ergodicité qui joue un rôle important en mathématique, en mécanique ou en physique statistique, car elle est la forme la plus faible de stochasticité.

Si une trajectoire de billard est partout dense dans le domaine Q , tôt ou tard la particule doit passer dans une figure F quelconque donnée de Q . On peut alors poser la question de savoir quelle portion de temps la particule reste dans la figure F . S'il s'avère que cette portion de temps est proportionnelle à la surface de la figure F , et si ceci est vrai pour une trajectoire typique, on dit que ce billard est un système ergodique. L'ergodicité peut en fait s'exprimer comme le fait que lors du mouvement un volume de l'espace de phase se déforme sans jamais reprendre sa forme initiale. Dans un système ergodique les trajectoires remplissent le domaine de manière partout dense et uniformément. Ce n'est par exemple pas le cas pour un billard circulaire où les trajectoires ne pénètrent jamais à l'intérieur d'un plus petit cercle concentrique intérieur.

On peut aussi formuler l'ergodicité d'un système comme la possibilité de remplacer les moyennes temporelles le long d'une trajectoire par les moyennes spatiales sur un ensemble de trajectoires (théorème de Birkhoff)..

Cette propriété est utilisée lors de l'étude de toute une série de modèles de la physique mathématique contemporaine. Pendant longtemps, à partir de la fin du siècle dernier il y a eu une hypothèse due à Boltzmann selon laquelle toutes les lois de la physique statistique pourraient être déduites du théorème ergodique. Il est aujourd'hui clair que cela n'est pas vrai, et que l'on doit au moins invoquer des propriétés plus fortes de stochasticité comme le mélange. Les points d'une trajectoire ergodique ne sont pas des ensembles aléatoires ou pseudo aléatoires, mais des ensembles quasi-aléatoires suffisants pour des simulacres de Monte-Carlo.

Le mélange est une propriété plus forte que l'ergodicité. Il implique que la trajectoire est ergodique et « perd la mémoire » de son déroulement. La fonction d'auto corrélation temporelle tend vers zéro lorsque le temps tend vers l'infini. La trajectoire devient une fonction pseudo-aléatoire. C'est la propriété minimale assurant un degré de stochasticité suffisant pour la vérification de propriétés statistiques, c.a.d. assurant l'applicabilité des lois de la théorie des

probabilités, par l'apparition de la propriété d'indépendance. En effet la propriété de mélange implique que la mesure de l'intersection d'un ensemble en mouvement avec un ensemble fixe tend vers le produit des mesures. Un petit volume de phase se déforme au point d'occuper finalement tout l'espace, tout comme une goutte d'encre dans l'eau finit par colorer tout le liquide, d'où le nom de mélange, exprimant la décorrélation avec le volume initial.

On peut définir des propriétés de mélange encore plus forte où l'indépendance concerne de plus en plus d'évènements. Enfin une propriété encore plus forte, la propriété K (Kolmogorov) apparaît lorsqu'il y a « presque » indépendance entre le présent et tout ce qui peut se produire dans un futur lointain. Ces manifestations de plus en plus forte de la propriété d'indépendance a pour effet de soumettre encore plus l'évolution des systèmes correspondants aux lois de la théorie des probabilités.

Un des résultats historiques de la théorie qualitative des systèmes dynamiques a été la démonstration par le mathématicien russe Sinai (1970) de la propriété K pour la boule d'un billard plan à bords incurvés vers l'intérieur. Cette démonstration très délicate a fait admettre définitivement les propriétés de mélange comme responsables de l'apparition du « chaos déterministe » .

SYSTEME DYNAMIQUE HYPERBOLIQUE (Cf. Dynamique hyperbolique*)

SYSTEME FERME

Un système fermé est un système qui ne peut échanger que de l'énergie avec le milieu extérieur.

Il ne faut pas confondre système fermé pouvant échanger de l'énergie avec le monde extérieur et système isolé*.

SYSTEME FORMEL

Notion permettant de préciser la conception d'une théorie axiomatique* en tant que calcul. La construction d'un système formel constituant une théorie axiomatique est appelée formalisation*.

Un système formel est un système de signes* comprenant une liste de symboles* primitifs, des règles de formation des formules à partir de ces symboles, des formules initiales postulats* ou axiomes*, des définitions*, des règles de démonstration ainsi que l'ensemble des

formules ainsi démontrables (théorèmes*). La décidabilité* est une des propriétés importantes des systèmes formels.

SYSTEME HAMILTONIEN

Système dynamique* dont les équations du mouvement peuvent être mises en coordonnées généralisées sous la forme d'équation de Hamilton*. C'est un système fermé* et conservatif* dont l'espace de phase a une structure symplectique*, et qui est décrit par un principe variationnel*.

Les systèmes hamiltoniens constituent une classe privilégiée de systèmes dynamiques, mais ils ne sont en général ni intégrables* ni ergodiques*. Ces deux dernières situations sont des cas limites et la situation la plus commune est celle où coexistent des trajectoires régulières et des trajectoires chaotiques. On peut s'intéresser à une courbe intégrale particulière ou à l'ensemble des courbes intégrales. C'est lorsque l'on s'intéresse à l'ensemble des courbes intégrales que les concepts de système intégrable ou de système mélangeant (et partant ergodique) prennent leur sens. Dans le premier cas toutes les courbes intégrales sont régulières, dans le second cas presque toutes les courbes intégrales sont pseudo aléatoires*. Ce sont les travaux de Kolmogorov, Arnold et Moser (théorème KAM) qui ont montré l'existence de systèmes où les deux types de trajectoires coexistent.

SYSTEME HEREDITAIRE

Pour un système dynamique* il n'y a aucune différence entre le passé et l'avenir, l'un et l'autre sont entièrement déterminés et de la même manière par le présent. Ce modèle de l'évolution qui convient parfaitement au monde inanimé semble inadapté au monde vivant visiblement dominé par les catégories de la mémoire*, du vieillissement et de la mort.

On définit un système héréditaire comme un modèle évolutif où l'évolution dépend du passé sans dépendre du futur. Du point de vue mathématique cela revient à remplacer les équations différentielles par des équations fonctionnelles*, en particulier des équations intégrales*.

Le système héréditaire est donc caractérisé par une mémoire*. Cette mémoire peut être continue ou emmagasiner les valeurs d'une fonction correspondant à des instants privilégiés avec ou sans retard dans l'effet. Les systèmes à retard ont un vaste champ d'application dans la technique et en particulier dans le domaine de la commande*, ainsi que dans les domaines de l'économie et de la physiologie où les

ordres émis par le système nerveux central ou périphérique ne sont exécutés qu'après des délais considérables. En physique comme ailleurs les systèmes à retard se manifestent dans le phénomène d'hystérésis*.

SYSTEME ISOLE

Un système isolé est un système qui n'a aucun échange avec l'extérieur.

SYSTEME LINEAIRE

Système physique qui satisfait au principe de superposition*, c.a.d . un système pour lequel la réponse à la somme de deux signaux* en entrée est la somme des réponses à chacun des signaux séparément.

Entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire il existe une relation remarquable :la transformée de Fourier* (T.F.) de la sortie est égale à la T.F. de l'entrée, multipliée par la T.F. de la fonction de réponse impulsionnelle, réponse du système à une entrée impulsionnelle (distribution δ de Dirac*). Cette T.F. de la fonction de réponse impulsionnelle est appelée la fonction de transfert du système. C'est la réponse du système à une fonction harmonique (trigonométrique) par exemple en optique la réponse à une onde plane. D'où l'intérêt en optique de représenter une onde arbitraire dans l'espace libre par une superposition d'ondes planes. C'est là le fondement de l'Optique de Fourier qui permet d'exprimer de très nombreuses opérations de l'optique au moyen de la transformation de Fourier*.

Les équations de Maxwell* régissant l'électromagnétisme* et l'équation de Schrödinger* régissant la mécanique quantique* décrivent des systèmes physiques linéaires. C'est pourquoi les théories correspondantes ont pu pour se développer faire largement appel à l'appareil de l'algèbre linéaire* et de la représentation de Fourier*

SYSTEME NON LINEAIRE

Système physique qui ne satisfait pas au principe de superposition*. Tous les systèmes réels sont non linéaires, et ne peuvent être considérés comme linéaires que d'une manière approximative.

Les systèmes non linéaires sont modélisés mathématiquement par des équations différentielles non linéaires, pour lesquelles il n'existe pas de méthodes générales de résolution, ce qui rend les

descriptions des phénomènes difficiles. Lorsque les termes non linéaires de ces équations dépendent de petits paramètres on peut utiliser une théorie des perturbations*. Dans le cas de fortes non linéarités il faut recourir à la simulation* numérique.

A la différence de l'électromagnétisme* et de la mécanique quantique* la plupart des théories de la physique mettent en œuvre des modèles mathématiques comportant des équations non linéaires, ce qui a souvent freiné leur développement. Citons pêle mèle l'hydrodynamique* ou la turbulence*, la théorie de la gravitation* ou la théorie quantique des champs*.

De très nombreux phénomènes intéressants à caractère universel apparaissent pour les systèmes non linéaires et sont spécifiquement dus à la non linéarité. Citons les autooscillations*, le chaos déterministe* ou les ondes non linéaires* et les solitons*.

SYSTEME OUVERT

Système thermodynamique* qui échange de la matière et de l'énergie avec le milieu extérieur.

Parmi les systèmes ouverts les plus importants il faut mentionner les systèmes chimiques qui sont le siège d'une réaction chimique continue, et qui voient entrer les réactants tout en laissant s'échapper les produits de la réaction. Les systèmes biologiques et les organismes vivants sont des systèmes chimiques ouverts et leur description relève de la thermodynamique de non équilibre*.

Les systèmes ouverts ne sont pas le siège d'états d'équilibres, mais peuvent au voisinage de l'équilibre donner naissance à des états stationnaires*. Loin de l'équilibre, dans des conditions non linéaires, peuvent se manifester des phénomènes spatio-temporels nouveaux, les structures dissipatives*, manifestation d'auto-organisation* résultant de l'action d'une rétroaction* sur les entrées du système.

Les systèmes cybernétiques*, quoiqu'en général de nature non thermodynamique, sont un cas général de système ouvert. Ils partagent avec les systèmes ouverts thermodynamiques les problématiques de régulation et d'optimisation du fonctionnement.

La physique classique ne considérait en général que des systèmes fermés*. Mais paradoxalement de nombreuses propriétés des systèmes qui pourraient laisser croire à des caractéristiques de systèmes fermés comme l'organisation* ou l'autonomie* sont en fait rendues possibles par l'ouverture. Ainsi en microphysique la situation où l'on peut parler d'une particule (atome) unique n'est pas celle d'un système isolé mais d'un système ouvert.

La notion de système ouvert résout la contradiction entre la croissance spontanée de l'entropie* et l'organisation liée à l'évolution biologique. Le fait que les systèmes vivants soient des systèmes ouverts leur permet d'importer des sources d'énergie pour assurer leur maintien en état de vie. Le système vivant ouvert est auto-organisateur*, il dépend sans cesse en cela de l'extérieur, de l'environnement.

SYSTEME THERMODYNAMIQUE

SYSTEMES (THEORIE GENERALE DES)

Courant scientifique lié à l'élaboration des problèmes philosophiques, méthodologiques et scientifiques de l'analyse et de la synthèse de systèmes complexes de nature générale. Tentatives de création d'une plate-forme unique pluridisciplinaire pour l'examen des systèmes complexes. Recherche des isomorphismes* fondamentaux entre les processus qui se déroulent dans des systèmes de types différents (technologiques, biologiques, économiques, sociaux). Théorie générale comportant comme cas particulier la théorie des systèmes dynamiques linéaires*, la théorie des automates*, la théorie des algorithmes*....Modèle abstrait, théorie axiomatisée de systèmes réels, permettant d'aborder d'un point de vue unique l'organisation* et le comportement (contrôle*, adaptation*, auto-organisation*, apprentissage*.....) des systèmes. On peut dire que d'une certaine manière toutes les théories axiomatisées de la physique relèvent de la théorie générale des systèmes, sans pour autant que les physiciens théoriciens soient toujours très conscients de cette situation ni très enclin à l'exploiter;

Des trois mots composant la dénomination c'est le mot système* qui fait le plus problème. A l'origine un système était un ensemble d'éléments en interaction (Ludwig von Bertalanffy*) ou un ensemble d'objets avec des relations entre eux . On suppose toujours que le système présente une certaine structure* et interagit avec un milieu extérieur (système ouvert*). Il y a en fait toujours une conception holistique* qui cherche à se formaliser.

Une grande attention est prêtée dans la théorie générale des systèmes à la question de la finalité*. La naissance même de cette théorie est née de la polémique entre mécanisme* et vitalisme*. Les mécanistes soutenaient que tous les processus de la vie pouvaient s'expliquer par des mécanismes physiques et mécaniques, sans avoir recours comme les vitalistes à des « forces vitales » ou à une quelconque « entéléchie ». La dispute est devenue très aiguë sur la

possibilité d'expliquer à partir de principes scientifiques généraux le comportement finaliste des organismes vivants. Le comportement final d'un système vivant est indépendant des conditions initiales, ce qui, argumentaient les vitalistes, est incompréhensible pour la mécanique. Bertalanffy s'est livré à une critique de ces positions vitalistes et a montré à l'aide d'exemples de la cinétique chimique que les systèmes vivants n'étaient pas les seuls à présenter des états finaux indépendants des états initiaux (équifinalité*). La position de Bertalanffy était en son temps d'une grande importance de principe, mais peut sembler aujourd'hui assez naturelle dans une époque où a été reconnue l'universalité de l'auto-organisation* et le rôle essentiel joué par les attracteurs* des systèmes dynamiques.

L'autre sujet de la dispute entre vitalistes et mécanistes était dans l'applicabilité du second principe de la thermodynamique aux systèmes vivants. Bertalanffy eu beau jeu de montrer que le second principe s'applique aux systèmes fermés et que les systèmes vivants étant des systèmes ouverts peuvent parfaitement augmenter leur ordre ou leur organisation sans violer le second principe. C'est aujourd'hui un fait bien connu en thermodynamique de non-équilibre* et dans l'étude des structures dissipatives*.

La théorie générale des systèmes a en commun avec la cybernétique*, le champ d'application : les systèmes ouverts* complexes, et la nature de la théorie : l'étude de modèles abstraits d'objets réels. Dans les deux cas les systèmes sont étudiés indépendamment du matériel concret qui les constitue. Ceci permet de décrire des systèmes très différents physiquement avec les mêmes concepts, et d'établir ainsi entre eux des isomorphismes* structuraux révélateurs. La théorie générale des systèmes est d'ailleurs née de la reconnaissance d'isomorphismes* entre les modèles de circuits électriques et d'autres systèmes.

Ce sont là les raisons qui font souvent réunir cybernétique et théorie générale des systèmes en un même corps de doctrine. Mais il faut bien comprendre que leurs enjeux méthodologiques sont distincts.

Alors que la cybernétique se veut une théorie épistémique formelle, occultant toute description précise de la structure du système, la théorie générale des systèmes se veut une ontologie formelle cherchant précisément à modéliser la structure dynamique du système. Nous avons bien là deux approches dont parlait René Thom, l'approche cybernétique et l'approche dynamique.

Malgré de nombreux développements formels, la théorie générale des systèmes n'a pas véritablement réussi à se constituer en une théorie avec des résultats spectaculaires. Elle s'est trouvée

concurrée à partir des années 70 par le développement de la théorie des systèmes dynamiques*, qui est une théorie qualitative générale des équations différentielles.

Car en fait la théorie générale des systèmes n'a pas réussi à se constituer comme théorie unique et s'est toujours trouvée réduite à un conglomérat interdisciplinaire. Elle comportait trois objets d'étude, « la simplicité organisée », « la complexité désordonnée » et « la complexité organisée ». On reconnaît là trois thématiques qui constituent aujourd'hui les sciences de la complexité*, avec en particulier la complexité aléatoire* de Kolmogorov et la complexité organisée* de Bennett.

On peut énumérer un certain nombre de disciplines qui intervenaient dans la théorie générale des systèmes : la cybernétique*, la théorie de l'information*, la théorie de la décision statistique*, la théorie des jeux*, la topologie*, la théorie des graphes*, la théorie des automates*.

SYSTEMES PHYSIQUES (THEORIE GENERALE)

L'élaboration du formalisme abstrait de la mécanique quantique n'est pas seulement producteur et consommateur de nouveaux outils mathématiques mais est aussi responsable de la mise en place de cadres généraux pour la pensée et la formulation des théories physiques.. Comme le soutient si souvent Constantin Piron* la présentation de la théorie quantique sous forme axiomatique* entraîne la constitution d'une véritable théorie générale des systèmes physiques, territoire régional d'une théorie générale des systèmes*. C'est d'ailleurs dans ce cadre là, proche de la cybernétique*, et où la théorie moderne des systèmes dynamiques* joue un rôle de plus en plus important de par les formalismes géométriques qu'elle véhicule, que l'on trouve les développements modernes les plus nombreux.. Une approche qui fait usage des structures symplectiques* comme outil général structurel. En particulier lors de la définition de stratégies de modélisation des systèmes complexes.

Mais la constitution d'une physique théorique générale comme théorie « unique » de la physique se heurte à des difficultés bien connues, dont la plupart sont liées aux problèmes des relations entre les théories* et au problème de la relation entre la théorie et l'expérience, c.à.d. de la qualification du fait* et des conditions de la connaissance*.

Constituer une physique théorique générale est une démarche abstraite globalisante issue du sentiment d'une profonde unité de la

physique théorique. Sentiment dominé par une ambiguïté constante sur l'origine de cette unité. Révèle –t-elle une unité de la nature, ou bien seulement l'unité du sujet connaissant?. Structure du monde ou structure de la perception et du langage?

Depuis plus d'un siècle la physique se constitue sur un postulat implicite d'objectivité; On fait comme si l'adéquation du discours à une réalité objective allait de soi. Pourtant Kant s'était déjà bien demandé pourquoi les mathématiques s'appliquaient elles à la nature alors que rien ne permettait à priori de conclure, à partir de l'expérience seule, que l'univers dut obéir à la logique de l'esprit humain.

L'espace*, le temps*, le mouvement*, la causalité*, le déterminisme* relèvent tout autant de l'anthropologie et de la psychologie que de la physique.

En préambule à toute physique théorique générale il y a donc des problèmes de linguistique, de logique et de formalisation, des problèmes sur le fonctionnement de la pensée et la formation des concepts, la puissance cognitive de l'analogie*, de la métaphore* et du symbole*. La théorie de la connaissance constitue le sujet d'un certain nombre d'œuvres majeures de la philosophie. Des auteurs comme Descartes*, Hume*, Kant*, Helmholtz* ont considéré qu'il y avait un lien très fort entre les théories de l'esprit et les doctrines des sciences.

Au XX^e siècle la théorie de la connaissance ajoute à la tradition kantienne et néo-kantienne trois facettes historiquement enchaînées :

Le positivisme logique* du Cercle de Vienne* qui met l'accent sur les structures logiques du langage et rencontre les grands travaux sur les fondements des mathématiques*.

Le structuralisme* qui met l'accent sur la dialectique fonctionnelle du Tout et des Parties. Il participe d'un développement conjugué de l'algèbre* moderne, de la cybernétique* et de la théorie générale des systèmes*. C'est une approche fonctionnelle de l'organisation* et une tentative de sémiotique* généralisée;

Le cognitivisme* contemporain qui se construit sur plusieurs domaines en effervescence, les neurosciences*- l'étude de la vision en particulier-, les doctrines de l'information* et l'intelligence artificielle*, et la dynamique qualitative (théorie des systèmes dynamiques*).

Ces divers courants n'on pas été sans influences sur des tentatives de formulation d'une physique théorique générale. Tentatives peu nombreuses et bien plus modestes que les travaux imposants réalisés en mathématiques. Au cours des soixante dernières années l'aiguillon principal d'une telle entreprise a été l'irritante

situation de la physique quantique*. C'est pour elle ou à cause d'elle que se sont développées des formulations générales de la physique, en espérant que la place qu'y occuperait la physique quantique en révélerait la signification; espoir pour l'instant largement déçu, mais source de tentatives intéressantes et de développements théoriques souvent stimulants.

Dans l'esprit du positivisme logique il faut citer des approches comme celles de Jean Louis Destouches (Principes fondamentaux de physique théorique. 1942), de Paulette Février (Les structures des théories physiques. 1951) et tout le courant des logiques quantiques* (Jauch, Piron*).

Il existe différentes approches structuralistes des théories physiques en particulier une école allemande (G. Ludwig);

Les approches géométrico-dynamiques sont plus récentes et vont de la théorie des catastrophes* au « tout symplectique* ».

SYSTEMIQUE

TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS DE MENDELEEV

TECHNOLOGIE

TECHNOLOGIE ET ENERGIE

TECHNOLOGIE ET IDEOLOGIE

L'histoire des sciences et des technologies voit s'affronter deux conceptions.

La conception internaliste, qui considère leur développement comme un processus autonome régi seulement par la logique de l'enchaînement des idées scientifiques et techniques.

La conception externaliste, qui lie leur développement à l'ensemble des phénomènes sociaux, économiques, idéologiques et intellectuels.

Un point de vue naïf pourrait laisser croire que le développement des techniques relève lui d'un internalisme caractérisé. L'enchaînement des savoir-faire et des pratiques productives rendraient compte de la technologie, qui serait alors, elle même, à l'origine des modes de vie et de pensée. Ainsi, la Révolution Néolithique, quelque huit mille ans avant J.C., résulterait du passage d'une économie de chasse et de cueillette, à une économie de l'élevage

et de l'agriculture, rendue possible par la maîtrise de nouvelles technologies.

En fait, il s'agit d'un saut qualitatif correspondant au passage d'une symbiose avec la nature à une action dirigiste sur celle-ci.

On peut se demander si un tel saut n'est pas plutôt la marque d'une évolution idéologique plutôt que d'un développement technologique. C'est ce que suggère Jacques Cauvin, archéologue du Proche-Orient, lorsqu'il écrit:

" La mutation néolithique qui a introduit vers 7800 avant J.C., au Proche-Orient plus tôt que partout ailleurs, la production de subsistance, c'est à dire une économie agricole et un peu plus tard agro-pastorale, a été immédiatement précédée autour de 8000, par un fort ébranlement d'ordre idéologique et symbolique.

A l'art presque exclusivement animalier des chasseurs cueilleurs "natoufiens" des X et IX èmes millénaires, où l'on représentait surtout des gazelles et peut-être des cervidés-daims-, succèdent brusquement deux figures symboliques nouvelles, apparues toutes deux dans la culture "khiamienne" des tout derniers siècles du IX ème millénaire.

L'une est féminine..... L'autre figure symbolique est animale: c'est celle du taureau.

Lorsqu'on retrouve un peu plus tard ces deux figures symboliques dans des contextes plus explicites et mieux conservés, par exemple dans le Néolithique d'Anatolie au VI ème millénaire- Catal Hüyük-, il apparaît évident qu'il s'agit alors des divinités mêmes, Déesse-Femme et Dieu-Taureau, qui se retrouvent dans tout l'Orient et la Méditerranée pré-classiques.

L'émergence en Syrie de ce couple divin à la veille immédiate de l'agriculture fait entrevoir que celle ci a dû refléter dans la pratique une nouvelle conception du monde, mettant fin à des centaines de millénaires de chasse-cueillette."

Syrie. Mémoire et Civilisation
Institut du Monde Arabe et Flammarion. 1993
p 38.

L'ensemble de ces faits incite à réviser l'idée même d'une causalité purement technique de la néolithisation.

Dix mille ans plus tard, notre époque apparaît sous un jour analogue à Martin Heidegger*, qui dans : "Qu'appelle-t-on penser ?" écrit:

"Notre époque n'est pas une époque technologique parce qu'elle est une époque de la machine, mais c'est une époque de la machine parce que c'est une époque technologique."

Heidegger envisage ainsi le primat de l'idéologie sur la technique.

Et de fait l'utilisation de la technique ne répond pas nécessairement à un développement interne de celle-ci. De nombreuses civilisations ont disposé de techniques qu'elles n'utilisaient pas ou si peu, faute d'une volonté précise. L'exemple le plus connu est celui de la Chine, qui bien que connaissant la boussole et l'imprimerie, n'en a pas fait l'usage qu'en fera l'Europe de la fin du Moyen-Age. B. Gille parle de "système bloqué" pour la Chine, et passe en revue les raisons possibles de ce blocage. Beaucoup sont d'ordre idéologique. La lecture de J. Needham (Science and Civilisation in China. Vol 2. History of Scientific Thought) suggère le rôle négatif de l'organicisme taoïste et de la féodalité bureaucratique à caractère rural. Le Yi-King, le fameux "Livre des Transformations" est une forme chinoise d'atomisme qui reflète la structure hiérarchisée de la société chinoise. Il en résulte une image de la Nature comme matrice stratifiée, où toute chose a sa place, liée à tout le reste par l'intermédiaire de canaux appropriés.

En face de cette Chine continentale, le Monde Grec des états-cités et de l'expansion maritime, où domine l'idéal individualiste des marchands. Il lui correspond un Atomisme qui préfigure dans la conception de la Nature, l'atomisme économique de la marchandise dans la société capitaliste naissante.

Dans un très beau livre "Atom and individual in the age of Newton" (Kluwer. 1986), G Freudenthal développe longuement l'histoire sociale du concept bourgeois d'individu et compare ce concept aux propriétés essentielles de la particule dans la pensée de Newton, comparée à celle de Leibniz.

Cette conception capitaliste de la marchandise sera au cœur de toutes les démarches de l'Occident, de la fin du Moyen-Age à nos jours. L'argent marchandise, les matières premières marchandise, les objets fabriqués marchandise, l'énergie marchandise (les sources d'énergie marchandise). Un seul grand problème technique: comment acquérir et transporter la marchandise, comment la stocker et la

répartir. Le problème central de la société capitaliste n'est pas tant de produire la marchandise que de la transporter et de la distribuer.

Le XXème siècle vit une transformation essentielle de cette problématique de par l'apparition d'une marchandise immatérielle et impalpable: l'information. Toutes les techniques se coalisent pour créer une Technologie de l'Information. Technologie de l'immatériel apparaissant de concert avec une Science où la Matière s'avère étrangement liée à des phénomènes sans Substance identifiable.

L'époque dite moderne est caractérisée par une domination des conceptions atomistes et des doctrines de l'énergie qui s'y rattachent. Gassendi, l'Atomiste, inaugure une époque matérialiste, dont le destin est scellé dans l'œuvre de Newton.

L'arrivée en force de concepts difficiles à rattacher directement à la matière et à l'énergie, marque dès la fin du XIX ème siècle, le début d'une époque nouvelle, que d'aucuns qualifient de post-moderne. On y assiste à un changement fondamental de système technologique, où le transport des signaux remplace progressivement le transport de la matière (transport des hommes compris).

Ce glissement d'intérêt de la matière vers le signal, s'accompagne d'abord, à la fin du XIX ème siècle et au début du XXème, d'une explosion baroque des conceptions matérialistes.

Elle s'exprime dans l'Art en particulier. Vienne, l'Art Nouveau, Lalique, Fabergé, les Ballets Russes chantent la Matière et les Formes qui s'y incarnent. La Tour Eiffel projette cet état d'esprit vers le Ciel. Marx et Freud sont les chantres de ce matérialisme, enraciné dans une Science et une Technologie, dominées par la Mécanique et la Thermodynamique et fécondées par la Chimie Atomistique.

Un Baroque de la Matière qui d'une certaine façon va lancer des feux durant tout le siècle en renouvelant les matériaux utilisés par la Technologie.

Il y'eut l'Age de la Pierre, l'Age du Bronze, l' Age du Fer. Nous vivons l'Age des Polymères et du Silicium.

Mais derrière tous ces matériaux, c'est le monde du Signal qui s'installe. Un univers du sans objet, où seuls les signes importent. Une culture dominée par l'information multiforme. Le célèbre tableau de Malevitch, "Quadrangle noir sur fond blanc" est comme un symbole de ce règne de l'information.

L'opposition entre la science et la technologie, entre le spéculatif et l'opératif, participe de l'opposition entre platonisme* et aristotélisme. Plus profond encore on peut voir là le grand conflit entre nomades et sédentaires. La science est nomadisme de l'esprit qui par nécessité globalise (pour mieux transporter) et rend abstrait (pour

mieux manipuler). La technologie est une sédentarité d'exploitation des ressources de la nature, qui énumère et décrit pour mieux opérer. Thom* considère la géométrie* comme une science et la logique* comme une technologie. Une technologie contre le mensonge.

TECHNOLOGIE QUANTIQUE

La technologie quantique est la nouvelle technologie qui prend explicitement appui sur les propriétés quantiques de la matière et de la lumière. Elle se développe à l'intérieur d'un système technique où le paradigme central est celui d'Information*. Elle succède à la technologie mécanique, technologie des forces, de l'énergie et des objets matériels, dont les technologies thermodynamique et électrodynamique ne sont que des rameaux.

La technologie quantique porte profondément l'empreinte du caractère de "boîte noire*" de la mécanique quantique, tout en s'adaptant de ce fait avec bonheur à l'ensemble des conceptions techniques contemporaines, englobées par le terme de cybernétique* qui signifie essentiellement information* et contrôle*.

La technologie quantique est née dans les années 50 de par l'exploitation des propriétés quantiques de la matière (semi-conducteurs* et transistors*) et des propriétés quantiques de l'émission de la lumière (émission stimulée* et laser*). Mais elle n'a atteint son véritable caractère que dans les années 80, lorsque l'on a su réaliser véritablement au laboratoire bon nombre d'expériences de pensée qui avaient servi à illustrer le caractère singulier et révolutionnaire de la mécanique quantique.

La véritable technologie quantique est dans la manipulation expérimentale de phénomènes liés aux trois concepts quantiques majeurs:

le monisme onde-corpuscule* (effet tunnel, phénomènes d'interférence*)

le concept d'état enchevêtré* et les corrélations quantiques* (information quantique*, cryptographie quantique*, téléportation quantique*, ordinateur quantique)

le concept de vide quantique* (effet Casimir*, émission spontanée*)

On peut dire que ce faisant, la technologie quantique est une technologie qui manipule directement les états quantiques, c.a.d. les amplitudes de probabilité quantiques*.

Les propriétés ondulatoires de la matière et les propriétés corpusculaires de la lumière sont mises en œuvre dans le microscope à effet tunnel (et les microscopies en champ proche, l'optique électronique, l'optique et l'interférométrie atomiques, le refroidissement laser et la condensation de Bose-Einstein*, la nanoélectronique, l'électronique moléculaire, le contrôle quantique des réactions chimiques, la cryptographie quantique et... les ordinateurs quantiques encore bien hypothétiques.

Les propriétés du vide quantique* sont utilisées pour le contrôle de l'émission spontanée* (matériaux à microcavités et à gap de photons, qui sont à la lumière ce que les semi-conducteurs* sont à l'électronique) et la création et l'emploi de la lumière dans des "états comprimés*". Il y a là une véritable "ingénierie du vide quantique", qui contribue à réaliser une maxime répandue selon laquelle : ce que l'électron fait bien, le photon le fait mieux. Après l'ère de l'électronique, celle de la photonique.

L'objet des manipulations qui constituent la technologie quantique n'est pas la matière mais l'état quantique et l'information. La Technologie Quantique est une Ingénierie des états quantiques.

La mise en œuvre de la technologie quantique nécessite au niveau technique des manipulations de la matière à une échelle très petite de l'ordre du nanomètre (10^{-9} mètres, c.a.d. un millième de micron, lui même le millième du millimètre), soit une zone où sont présents au plus quelques atomes. L'ensemble de ces techniques est couramment désigné par le terme de Nanotechnologie*.

Technologie Quantique et Nanotechnologie rencontrent sans cesse les problèmes pratiques et théoriques liés au Vide, classique ou quantique.

TECHNOSCIENCE

TELEOLOGIE

TELEPORTATION QUANTIQUE

TEMPS

Il n'y a pas de définition du temps. L'objet temps n'existe pas. Le mot temps est largement polysémique.

L'expérience de l'espace* physique a depuis les grecs permis de dégager des concepts géométriques adaptés à la représentation des phénomènes spatiaux. Il n'en est pas de même pour le temps, dont on n'arrive pas à donner une formalisation naturelle qui ne soit pas simplement calquée sur les représentations de l'espace, en évitant de lui donner un caractère absolu nié par la théorie de la relativité* et en lui permettant de rendre compte d'une manière satisfaisante du problème de l'irréversibilité*.

D'un côté le temps est un phénomène psychologique et linguistique, une production de la pensée pour permettre à l'individu de se situer par rapport aux événements dont il est le témoin. Il est constitué par une conscience aigüe du présent relayée par l'activité de la mémoire. Le temps a pour fonction de renouveler l'instant présent. C'est ce temps là, le temps qui passe, où la notion de passé et de futur viennent produire le sentiment d'écoulement, qui fait depuis toujours l'objet des discussions philosophiques. Son rapport au temps de la physique reste problématique. Ce temps de la conscience est l'acte fondateur du temps qui passe.

Jusqu'à nouvel ordre, en physique, le temps est un paramètre linéaire, et est représenté par la droite réelle donnée à priori. C'est le temps homogène de Newton*. Du temps qui ne passe pas. Et pourtant, plus encore que l'espace, le temps n'est pas donné expérimentalement d'avance. Ce n'est pas un cadre comme le pensait Kant*. C'est une caractéristique qui se manifeste lors des changements et du mouvement* des systèmes physiques. Une expression de la causalité* qui exclut le renversement* du temps. Une caractéristique qui n'a aucune raison de rester invariante ou stable.

En tant que paramètre linéaire le temps semble prendre une signification physique à travers la conservation de l'énergie* liée en mécanique classique à l'homogénéité du paramètre temps (équivalence des durées). Ce temps là a un rôle de cadre des événements qui s'affirme en relativité restreinte où le temps est attaché au système de référence inertiel et indissociablement lié à l'espace correspondant (espace-temps*). La relativité générale modifie ce cadre en lui donnant une courbure liée à la matière, ce qui lie le temps à la matière. L'existence de l'antimatière* donne à ce temps paramètre temps une consistance physique supplémentaire. On peut s'étonner de ce que le temps paramètre serve de support à la théorie des systèmes dynamiques* dissipatifs ou aux conceptions de la cosmologie* contemporaine. Seule la corrélation quantique* jette un doute sur le bien fondé de cette représentation du temps. Le succès de ce temps irréaliste dans l'édification d'une grande part de la physique reste un

de ces miracles où l'irréel est la source d'un discours cohérent qui semble coller au réel. Exemple, le succès de la mécanique classique comme modèle ne tenant pas compte du frottement*. Reste à savoir si cette représentation du temps résistera aux avancées futures de la biologie.

La théorie des systèmes dynamiques* survalorise un présent, porteur de toute l'information sur l'évolution future. Tout en prévoyant une grande diversité de scénarios spécifiques, que la physique confirme, elle n'utilise pas d'autre temps que le temps linéaire. Elle ne permet pas d'élucider le problème de l'irréversibilité*.

Le temps se manifeste pleinement lors des phénomènes complexes, souvent aléatoires*, dans des circonstances où il est difficile d'admettre qu'il se développe selon une ligne faisant paraître très éloignées des choses qui sont en fait rapprochées ou vice versa. Comme le dit Michel Serres le temps coule de façon extraordinairement complexe, inattendue, compliquée....L'idée que le temps puisse être une grandeur aléatoire* dont les moyennes à petite échelle fourniraient un temps régularisé.

Le temps se présente manifestement sous deux aspects, le temps dans la physique théorique* et le temps de la physique naturelle :

le temps de l'ordre, celui de la succession des événements, celui des horloges* et de la durée, de la périodicité et de la causalité*, modélisé par la droite réelle. Un temps qui ne passe pas.

le temps du désordre et de l'irréversibilité*, du non recommencement, de la date historique et du calendrier, de la complexité*. Un temps qui passe, lié aux phénomènes stochastiques*, et qu'il faudrait certainement modéliser par une variable aléatoire*.

Ce second temps serait le temps fondamental, le premier lui étant lié par un opération de régularisation. Conception en faveur d'un chaos fondamental et omniprésent, porteur d'un temps aléatoire cosmique, et d'un ordre local repérable par un temps ordonné et régulier. Les phénomènes de base seraient irréversibles, et c'est maintenant de la réversibilité dont il faudrait rendre compte. Ce qui revient à poser le problème aux antipodes de la démarche classique qui cherche à tirer l'irréversibilité* de la réversibilité.

De nombreux phénomènes physiques semblent vouloir donner au temps une signification physique liée à un écoulement unidirectionnel, la flèche du temps. C'est le cas avec l'irréversibilité* thermodynamique, l'irréversibilité de la mesure* en mécanique quantique ou l'évolution cosmologique. Cette flèche du temps n'apparaît pas naturellement dans la représentation paramétrique ordinaire, et si la problématique ordinaire de l'irréversibilité* consiste

à vouloir déduire la flèche du temps dans le cadre de cette représentation, on doit se demander après tout si le problème n'est pas de changer de représentation du temps en physique. Changer le visage du temps.

Il est en fait difficile de rendre compte de la multiplicité des temps qui pose de délicats problèmes de coïncidences et de synchronisations. En fait le temps est profondément lié au transfert d'information, perdue ou gagnée. A travers l'information, toute structure organisée ou désorganisée porte la marque de l'évolution qui a présidé à sa formation. Elle est le témoin simultanément de la fuite du temps et du gel du temps. C'est un piège à temps. Prigogine* considérait que la chimie conjugue le temps et la permanence et que la molécule met dans un récipient la fragilité du temps.

Il y a le temps du monde et le temps des hommes, le temps chaotique et le temps rythmique, sinon cyclique. Un temps cyclique qui émerge du temps chaotique à travers le phénomène d'auto-oscillation*. Pour reproduire le mouvement périodique des planètes l'homme crée des horloges* qui transforment le temps chaotique en temps périodique, le temps irréversible en temps renversable* représenté en physique. On ne se voit pas vieillir en regardant une horloge. L'auto-oscillation est un creuset qui transforme le désordre dissipatif en ordre, le temps perdu en temps conservé, le chaos* en cosmos*. Elle visualise, comme bien d'autres actions de l'homme ou de la nature, la brisure de symétrie* profonde au cœur de l'univers.

Il y a l'histoire et l'horloge. L'un des faits les plus importants de l'histoire des religions fut la transformation de la célébration cyclique des fêtes agricoles en commémoration d'évènements historiques. Pour Israël les évènements uniques du temps historique étaient chargés d'un sens spirituel plus lourd que le processus toujours répété du cycle de la nature dont cependant dépendait leur subsistance. Le Dieu d'Israël était le dieu des évènements : celui qui a créé le monde tel qu'il est, celui qui a délivré de l'esclavage, celui qui a révélé la Thora.....celui qui se manifeste dans des évènements historique, y compris ceux à venir comme l'ère messianique, plutôt que dans des objets et dans des lieux. Le peuple juif est un bâtisseur de temps.

TEMPS PROPRE (Cf. Relativité restreinte*)

Temps mesuré par des horloges* liées à un système de référence inertiel, soit un système par rapport auquel le système physique est au repos. Des horloges en mouvement avec le système.

La synchronicité* doit être redéfinie en tenant compte des repères inertiels servant à définir le mouvement. Le temps n'est pas indépendant de l'espace (espace-temps*)

TEMPS (Redécouverte du)

Phénomène de la culture contemporaine, lié à une réactualisation des problèmes de la temporalité tant dans les sciences exactes que dans les sciences humaines. Le terme « redécouverte du temps » a été proposé par Prigogine* pour caractériser l'ensemble des travaux de son école de thermodynamique de non équilibre*. C'est souligner le rôle que l'irréversibilité joue dans la définition d'un temps qui n'est pas le temps des horloges.

C'est un intérêt nouveau pour le temps qui passe.

Il dénonce, de son point de vue, le fait que les deux principales sciences du XX^e siècle- la relativité et la mécanique quantique- ont gardées des lois réversibles, montrant par là une négation radicale du temps, que n'avait jamais à ce point affichée aucune culture. Alors que c'est l'irréversibilité* en tant que telle qui est à l'origine de l'ordre à tous les niveaux, qui fait surgir « l'ordre du chaos ». Alors que les systèmes biologiques ont tous un passé et que la matière comme objet des lois de la physique n'est pas une donnée mais un produit de l'histoire. Alors que la vie* ne peut s'expliquer sans tenir compte de l'évolution* et que la structure de l'univers témoigne de l'existence d'une origine*. Nous vivons dans un univers où la symétrie entre le passé et le futur est brisée, et où des processus irréversibles conduisent vers l'équilibre dans le futur. Le problème de l'être* devient celui du devenir. Une nouvelle synthèse (alliance) semble nécessaire entre les sciences exactes qui ignorent l'irréversibilité et les sciences humaines qui n'ont jamais abandonné l'idée de temporalité. C'est là d'ailleurs une des sources de conflit entre sciences physico-chimiques et sciences humaines.

Les écrits et les propos de Prigogine, tout en sensibilisant la communauté scientifique au problème du temps et en l'encourageant dans l'étude des phénomènes temporels du vivant (comme les rythmes biologiques*), n'ont pas suscité de représentation nouvelle du temps dans les systèmes physiques. Il n'y a toujours pas d'opérateur pour une observable* temps en mécanique quantique*, malgré une proposition due à Prigogine lui-même. Quant aux tentatives pour déduire l'irréversibilité des équations renversables* de la dynamique

classique, elles se trouvent dans une impasse, malgré une tentative de Prigogine et de ses élèves.

La redécouverte du temps vient par contre conforter tout un mouvement philosophique dans le post-modernisme*. Ce mouvement s'enracine dans l'œuvre de Heidegger* qui a montré que la profondeur de la problématique de toute ontologie* est liée au problème du temps. « *Sein und Zeit* » (*Etre et temps*) constituant l'évènement comme l'introduction du Temps dans l'Etre, n'est pas autre chose qu'un tournant de la philosophie « de l'être* au devenir » selon la terminologie de Prigogine. C'est cette tradition philosophique qui est suivie dans la philosophie post-moderniste, de l'aveu même de Derrida*. Le facteur temps joue un rôle important dans l'analyse de la subjectivité par Sartre*. Pour lui le temps est un lien et le Moi a un caractère temporel dans son existence même.

L'idée d'irréversibilité envahit les sciences humaines. Roland Barthes parle de l'irréversibilité du récit. Derrida ou Barthes insistent sur l'histoire passée et l'évolution du texte.

TENSEGRITE

Il s'agit d'un terme inventé par l'architecte américain Buckminster Fuller en 1955, et qui résulte de la contraction de « tensile » et d' « integrity ». Ce terme désigne la faculté d'un système à se stabiliser mécaniquement par le jeu de forces de tension (continues) et de forces de compression (discontinues) qui s'y répartissent et s'y équilibrent.

Un système basé sur l'intégrité tensionnelle est un système « architectural » caractérisé par des éléments résistants à la compression qui ne se touchent pas, mais qui sont interconnectés par des îlots de tension.

On a appliqué le concept de tenségrité dans un modèle de comportement cellulaire. La tenségrité permet de prévoir les comportements complexes de la cellule*, d'imiter la formation de motifs à l'intérieur du cytosquelette et de contrôler l'expression de la forme de la cellule en expression moléculaire. L'un des principaux apports de ce modèle est qu'il a permis de faire évoluer les cadres de la biologie cellulaire* Centrée avant tout sur les composants moléculaires, ces composants apparaissent à la lumière de la tenségrité intégrés à un ensemble hiérarchisé au fonctionnement collectif.

Dans l'intégrité tensionnelle notre corps n'échappe pas aux lois des forces physiques qui organisent la matière A l'échelle moléculaire, les éléments qui le constituent, s'assemblent par attraction et répulsion. A plus grande échelle, les éléments s'organisent pour former des structures articulées plus complexes (squelette cellulaire, matrice extracellulaire...). La dynamique des formes fait intervenir alors une opposition entre tension et compression. Dans le corps en mouvement, les éléments élastiques et les éléments rigides se disposent de façon à ce que tout ce qui converge vers les parties rigides soit redistribué dans les parties élastiques. L'équilibre « tensionnel » qui en résulte assure l'intégrité du tout (tenségrité). La forme n'apparaît que sous une tension globale qui lui permet de résister à la déformation, l'altération d'une partie étant compensée par un remaniement du tout. Par la tenségrité, les forces extérieures se transmettent au plus profond du corps. La tenségrité assure la stabilité structurelle*.

TENSEUR

Un tenseur est une grandeur définie par des coordonnées* (ensemble de composantes) qui se transforme selon une loi particulière lors d'un changement du système de coordonnées. Un vecteur* est un tenseur particulier à 3 composantes. Le champ électromagnétique* est un tenseur qui regroupe champ électrique et champ magnétique.

Le calcul tensoriel étudie les tenseurs et les lois des actions sur ces tenseurs. C'est une généralisation du calcul avec les vecteurs* et les matrices*. Il est beaucoup utilisé en géométrie différentielle*, en particulier dans la théorie des espaces de Riemann*, en électrodynamique* et en théorie de la relativité*.

Pour décrire de nombreux faits physiques et géométriques on introduit habituellement un système de coordonnées* ce qui permet de décrire différents objets à l'aide d'un nombre ou d'un ensemble de nombres, ainsi que les relations entre objets comme des égalités entre ces ensembles de nombres.

Certaines de ces grandeurs sont décrites par un seul nombre, elles sont appelées scalaires (ex. en physique la masse ou la température....) et ne changent pas lors du passage d'un système de coordonnées à un autre. D'autres grandeurs, les vecteurs* sont données par trois nombres, les composantes du vecteur, qui se transforment selon une loi déterminée lors d'un changement de système de coordonnées.

D'autres grandeurs, ayant éventuellement plus de composantes, se transforment d'une manière plus complexe que les vecteurs lors du changement du système de coordonnées, ce sont les tenseurs.

Créé à la fin du XIX^{ème} siècle le calcul tensoriel n'a pas tout d'abord attiré l'attention. Son succès est dû à l'apparition de la relativité générale dont la formulation mathématique repose entièrement sur le calcul tensoriel.

Tout comme pour les vecteurs du calcul vectoriel* on peut donner une définition intrinsèque des tenseurs, quitte à les représenter ensuite dans un système de coordonnées.

TERME

Expression verbale ou symbolique dénotant un concept, et entrant comme partie constitutive dans un discours.

TERME ABSTRAIT

Les termes* peuvent être concrets ou abstraits*. Les termes concrets dénotent les objets et les choses du monde. Les termes abstraits n'existent qu'à l'intérieur d'un discours.

Les termes abstraits ont toujours été la source de controverses philosophiques. Ils sont au cœur des débats entre nominalistes* et réalistes*, entre instrumentalistes* et réalistes*. Ces débats concernent le statut dévolu à la notion d'abstraction*.

TERME THEORIQUE

Un terme théorique est un concept qui figure dans la construction d'une théorie* et ne prend son sens que dans le fonctionnement du discours théorique. C'est un nonobservable*. Il peut parfois être interprété comme représentation* de faits observables ou non dans le cadre de la théorie. La force* ou le vide quantique* sont des termes théoriques.

TECHNOSCIENCE

THEODICEE

THEOLOGIE NATURELLE

THEOREME

THEORIE

Une théorie est une construction formelle qui relie entre eux les différents facteurs et les différents aspects d'un phénomène dans le souci d'établir une relation causale entre certains d'entre eux. C'est un ensemble de propositions reflétant les relations objectives entre les événements d'une réalité. Dans une théorie les différentes propositions se déduisent les unes des autres selon des règles logiques. La théorie doit produire des prévisions en accord avec les résultats expérimentaux. Il y a entre la théorie et l'expérience un lien encore plus fort en ce sens qu'il n'y a pas d'expérience qui ne soit menée sans une théorie sous jacente même à l'état d'hypothèses simples (Cf. *Expérience et théorie**).

En présence de plusieurs théories pour un même phénomène on peut exercer un choix en utilisant le critère de falsification* introduit par Popper*, selon lequel une bonne théorie doit être réfutable.

La philosophie des sciences distingue deux types de théories selon la position que l'on adopte vis-à-vis du réalisme scientifique*. La conception syntactique suppose que les entités de la théorie sont des objets du monde et que la théorie établit entre elles des relations logiques. On peut reprocher à la conception syntaxique son orientation linguistique. La conception sémantique suppose que les termes de la théorie sont des symboles* des choses, et que la théorie offre un modèle* de la structure* régnant entre les choses. Le réalisme structural* s'inscrit dans une telle conception sémantique des théories. La théorie est donc alors une classe de modèles.(Cf. *Symbolisme en physique**)

La conception sémantique, très en faveur durant les dernières décennies présente néanmoins certaines difficultés. Ceci apparaît en particulier dans le problème de l'équivalence des théories. Ainsi la mécanique hamiltonienne* et la mécanique lagrangienne* sont équivalentes du point de vue syntactique mais ne le sont pas du point de vue sémantique. Il en est de même pour la théorie des matrices de Heisenberg et la théorie de l'espace de Hilbert pour la mécanique quantique*. Une problématique qui va se retrouver pour les différentes interprétations* de la mécanique quantique et qui se trouve liée à la démarche théorique de la boîte noire*. Toutes ces discussions tournent autour de ce que l'on appelle une structure mathématique. Elles portent aussi sur l'importance ou non que l'on accorde à la notion de théorie unitaire* et à la recherche de l'unification (Cf. *Unification de la connaissance** et *Unification en physique**).

THEORIE UNITAIRE (Cf. UNIFICATION DES FORCES (GRANDE))

THEOSOPHIE

Doctrine mystico-religieuse synchrétique* sur l'unité de l'âme humaine et de l'âme divine et sur la possibilité de relation directe avec l'autre monde. C'est une doctrine de la divinité, qui s'appuie sur une expérience mystique subjective, mais qui à la différence des mystiques habituelles, cherche à exposer cette expérience sous forme d'un système organisé. A ce compte là on peut y rattacher le gnosticisme*, le néo-platonisme*, la kabbale*, l'hermétisme* et les rose croix.

En un sens plus restreint, la théosophie est une théorie mystique du XVI^e au XVIII^e siècle, située au-delà de la tradition chrétienne dans son ensemble. C'est la théorie à laquelle sont attachés les noms de Paracelse*, de Jacob Boehme*, d'Emmanuel Swedenborg* du Comte de Saint Germain* et de Louis Claude Saint Martin*. De nombreux théosophes, comme Paracelse, supposaient que la théosophie comporte en plus de l'expérience mystique de la contemplation de la Divinité, la découverte des secrets de la nature et l'accomplissement de miracles (thaumaturgie). Franz von Baader* exerça à l'époque romantique une influence sur Schelling*. Chez Schelling le terme théosophie désigne une synthèse entre la connaissance mystique de Dieu et la philosophie rationnelle.

A la fin du XIX^e siècle l'œuvre de Helena Blavatsky a marqué les esprits. Dans ses livres elle expose une théosophie nouvelle où elle cherche à rapprocher le sens ésotérique de tous les symboles religieux. Sa doctrine s'appuie sur la philosophie indienne (bouddhisme, indhouisme et brahmanisme). Elle est considérée comme une philosophie religieuse, mystique et ésotérique ou comme une forme de cosmisme*. A l'origine de l'univers se trouve la Cause Première ou l'Absolu. Tout ce qui se trouve dans l'univers porte en soi la marque de la Cause Première. L'homme a la possibilité de s'unir à la Cause Première. La Nature n'est pas une combinaison aléatoire d'atomes et l'homme a une place déterminée dans l'Univers. Il y a une unité de la Nature que la science n'a pas réussi à montrer. Il n'y a pas de dieu créateur mais un Principe Divin Universel, l'Absolu. L'univers se développe de lui-même, de sa propre nature, sans aucune création.

A partir de 1875 où fut créée la « Société Théosophique » de New-York, la théosophie se répandit dans le monde et participa fortement de l'ésotérisme ambiant en Europe. Elle eu une influence marquée sur de nombreuses personnalités, en particulier dans le

monde de la littérature et de l'art. Mais René Guenon, un ésotériste influent, s'est fortement opposé à la théosophie.

THERMODYNAMIQUE

La thermodynamique est l'étude des systèmes physiques où l'énergie* prend deux formes : la chaleur* et le travail* (mécanique, chimique, électrique...). Cette discipline phénoménologique s'organise à partir d'une séparation entre le système et le milieu dans lequel il évolue et dont il est séparé par une limite. Tout système est caractérisé par un état* qui est défini à partir d'une énergie* et d'une entropie* .

La thermodynamique se construit à partir de lois fondamentales qui traduisent les résultats de nombreuses observations. Les fondements de ces lois tout comme leur lien avec le mouvement des corps constituant le système font l'objet de la mécanique statistique*.

La thermodynamique considère essentiellement les états d'équilibre des systèmes et les passages entre ces états d'équilibre, dénommant processus réversible tout passage infiniment lent entre une succession d'états d'équilibres. En situation de non équilibre on parle de processus irréversibles* entre états stationnaires*.

Il existe trois types de thermodynamiques :

La thermodynamique d'équilibre qui s'organise à partir de concepts et de relations entre des variables d'état, mais concerne uniquement les systèmes fermés* dont l'évolution est la conséquence d'échange d'énergie avec le milieu.

La thermodynamique de non équilibre* linéaire, ou thermodynamique des processus irréversibles* linéaires, qui s'applique aux systèmes ouverts* caractérisés par des relations linéaires entre les flux et les forces auxquelles le système est soumis. Les états d'équilibre y sont remplacé par des états stationnaires*.

La thermodynamique de non équilibre* non linéaire, où le système s'écarte résolument de l'équilibre pour atteindre des régimes où se manifestent des phénomènes nouveaux comme l'apparition de structures dissipatives*.

THERMODYNAMIQUE D'EQUILIBRE (LOIS DE LA)

La thermodynamique d'équilibre est le domaine de la physique qui étudie les propriétés des systèmes macroscopiques en état d'équilibre thermique et les processus de passage entre ces états en se

basant sur l'analyse des transformations possibles de l'énergie de ces systèmes sans tenir compte de leur structure microscopique.

Elle s'appuie sur trois lois fondamentales, dites aussi principes.

Première loi : loi de la conservation de l'énergie pour un système thermodynamique . La quantité de chaleur échangée par le système correspond à la variation de l'énergie interne et au travail effectué contre les forces extérieures par le système. Cette loi a été formulée au XIX^e siècle par R. Mayer, J. Joule, et H. Helmholtz*.

Seconde loi : loi sur l'impossibilité du mouvement perpétuel* de second espèce. Les processus thermiques ne peuvent se dérouler naturellement à vitesse finie que dans une seule direction.

Il en existe plusieurs formulations :

Il n'est pas possible d'imaginer un processus dont le seul résultat serait de produire du travail équivalent à toute la chaleur fournie par une source thermique.

Il n'est pas possible d'envisager un processus qui transférerait de l'énergie d'une source plus froide vers une source plus chaude.

Cette seconde loi exprime la tendance d'un système à évoluer spontanément des états les moins probables vers les états les plus probables.

La formulation moderne de la seconde loi s'exprime à l'aide de la notion d'entropie* : dans un système fermé toute transformation doit laisser l'entropie constante ou provoquer sa croissance. Dans un état d'équilibre l'entropie d'un système fermé atteint son maximum et aucun processus macroscopique ne peut plus s'y dérouler.

Dans un système ouvert* la variation de la chaleur est inférieure ou égale à la variation d'entropie multipliée par la température selon que le processus est irréversible* ou réversible.

Troisième loi : l'entropie de tous les systèmes tend vers zéro lorsque la température tend vers le zéro absolu. Il s'ensuit l'impossibilité d'atteindre exactement le zéro absolu par un procédé quelconque.

On peut construire toute la thermodynamique à l'aide des fonctions température (T), énergie interne (U) et entropie (S), mais de nombreux résultats peuvent être obtenus de manière plus simple avec

une interprétation plus suggestive à l'aide de nouvelles fonctions définies à partir des fonctions primitives, les potentiels thermodynamiques*.

THERMODYNAMIQUE DE NON EQUILIBRE

La thermodynamique de non équilibre concerne un système ouvert* caractérisé par des relations linéaires entre les flux et les forces. Les effets sont proportionnels aux causes. Les flux d'échange d'énergie ou de matière entre le système et le milieu peuvent mener à un état stationnaire* de non équilibre, pour lequel la production interne d'entropie atteint un minimum. La production d'entropie y est constante. L'état stationnaire dû à une réorganisation continue, évacue une partie de l'entropie produite. Ainsi le second principe de la thermodynamique reste vérifié pour la variation d'entropie globale, somme de la variation de l'entropie interne et de la variation d'entropie due aux échanges avec l'extérieur.

La thermodynamique de non équilibre est l'étude des processus irréversibles* et des inégalités qui caractérisent le sens de leur déroulement.

Il existe de nombreuses lois quantitatives phénoménologiques décrivant les processus irréversible par des relations de proportionnalité, comme la loi de Fourier* sur la proportionnalité du flux de chaleur qui se propage au gradient de température ou la loi d'Ohm sur la proportionnalité du courant électrique au gradient de potentiel.

La thermodynamique de non équilibre non linéaire étudie les situations où les régimes simples prédits par les lois linéaires deviennent instables, Loin de l'équilibre les états stationnaires peuvent perdre leur stabilité, et il peut apparaître spontanément des structures spatiales ou des oscillations à partir de systèmes parfaitement homogènes au départ. Ces structures dissipatives* jouent un rôle déterminant en hydrodynamique, en chimie ou en biologie.

La thermodynamique des processus irréversibles est initialement l'œuvre de physiciens hollandais et belges (Onsager, De Donder, Prigogine*, Defay et De Groot). Elle a donné lieu par la suite à la formation d'écoles concurrentes aux approches assez distinctes.

TOPOISOMERASE

TOPOLOGIE

La topologie est cette partie des mathématiques qui cherche à préciser la notion de continuité*. Elle étudie les propriétés des figures et de leurs dispositions qui se conservent par homéomorphisme*. La topologie traite de la recherche des invariants dans une géométrie débarrassée de toute idée de mesure ou de distance. On peut la considérer comme une variante de la géométrie avec une grande extension des objets géométriques. Son concept central d'homéomorphisme* ne nécessite l'intervention d'aucun concept géométrique comme la distance, la linéarité.....pas plus d'ailleurs que sa notion essentielle de transformation continue. Elle considère comme des situations géométriques semblables des situations qui se déduisent l'une de l'autre par transformation continue, à la différence de la géométrie euclidienne* qui n'envisage que des équivalences par des transformations qui conservent les distances et les angles. En géométrie euclidienne, deux objets sont équivalents si on peut transformer l'un en l'autre à l'aide d'isométries (rotations, translations, réflexions, etc....) c'est-à-dire, des transformations qui conservent la valeur des angles, des longueurs, des aires, des volumes et autres. En topologie, deux objets sont équivalents dans un sens beaucoup plus large. Ils doivent avoir le même nombre de morceaux, de trous, d'intersections etc.... En topologie, il est permis de doubler, étirer, tordre etc....des objets mais toujours sans les rompre, ni séparer ce qui est uni, ni coller ce qui est séparé. Par exemple, un triangle est topologiquement la même chose qu'un cercle, c'est-à-dire qu'on peut transformer l'un en l'autre sans rompre et sans coller. Mais un cercle n'est pas la même chose qu'un segment (on doit casser le cercle pour obtenir le segment).

L'objet central de la topologie est l'étude des propriétés topologiques invariantes par homéomorphisme d'un espace topologique à un autre. Au titre de ces propriétés invariantes on trouve la connexité, la compacité et la dimension.

Historiquement, la topologie a succédé à la géométrie, dont elle est une généralisation ; mais mathématiquement, la topologie précède la géométrie, qui n'en est qu'un cas particulier : les manuels et traités qui, comme celui de Bourbaki, procèdent du général au particulier, commencent ainsi par traiter de la topologie, dont dérivent les concepts et théorèmes de la géométrie.

TOUT (LE TOUT ET LES PARTIES)

La catégorie du Tout joue un rôle essentiel dans l'ontologie* en général et dans l'ontologie de la physique* en particulier. Le Tout exprime et manifeste l'existence de relations entre objets ou de corrélations entre évènements, en rassemblant tous les acteurs de ces interactions en un ensemble unique promu au rang d'objet*, et désigné souvent par le terme système*. Ces acteurs, les parties, n'acquièrent leur véritable statut qu'en fonction du Tout. C'est là la doctrine fondamentale du structuralisme*, manifestant l'existence d'une non-linéarité essentielle à la constitution d'un Tout. Parler d'un système physique (isolable) c'est affirmer l'existence effective d'une totalité.

Le problème du Tout est à la fois un problème de reconnaissance globale (holisme*) et un problème d'analyse non-réductionniste du Tout par rapport à ses parties (émergentisme*, cause descendante*).

Le Tout n'est donc pas simplement la somme des parties et la théorie des ensembles* prouve que l'ensemble de tous les ensembles n'est pas un ensemble. Il ne suffit pas de mettre des objets ensemble pour qu'ils forment un Tout.

De très nombreux enjeux de la physique contemporaine s'avèrent de manière « surprenante » liés à l'échec ou à la réussite de la mise en œuvre du concept de Tout.

Ainsi le chaos déterministe* se manifeste dans l'impossibilité de donner à un ensemble d'évènements un caractère de totalité par suite de l'effondrement des corrélations. Cet échec se traduit par la non représentabilité (non-intégrabilité*) de l'ensemble des évènements.

La notion de champ* au contraire émerge comme un ensemble de potentialités liées les unes aux autres, et une théorie de champ formule les lois qui les relient entre elles, en donnant une représentation globale (géométrique) de la situation.

Les corrélations de type EPR* en microphysique prouvent que certains systèmes font effectivement corps d'une manière imprévue, ce que l'on qualifie de non séparabilité (en parties distinctes).

La stabilité de la matière, le fait qu'une molécule ou un solide forment une totalité stable, est liée en théorie quantique à ce que l'ensemble des électrons se représente comme une mer non séparable où l'individualité des parties (« électrons ») s'évanouit.

Le vide quantique est un Tout sans parties, ce qui convient bien à son caractère de forme substantielle*.

Le panthéisme* est un philosophie du Tout que constitue la Nature*, qui a tenté bien des savants.

TRADUCTION

TRAJECTOIRE

La trajectoire d'un objet matériel est l'ensemble des points de l'espace tridimensionnel parcourus par cet objet en mouvement. Ce concept qui est profondément lié à la notion d'identité de l'objet sous-tend toutes nos images du monde.

La notion de trajectoire devient plus abstraite lorsqu'on l'étend à l'ensemble des états* dans lesquels se trouve successivement un système physique. C'est une trajectoire dans l'espace de phase*, figure géométrique représentant l'évolution du système. En mécanique classique l'espace de phase est l'espace des position-impulsion.

Il est remarquable que deux des révolutions scientifiques du XX^e siècle soient liées à l'effondrement de la notion simple de trajectoire et par là à une plus grande conceptualisation abstraite des faits de la nature.

La mécanique quantique est notoirement liée à la disparition de la notion de trajectoire spatio-temporelle des particules élémentaires, remplacée par une trajectoire dans l'espace des états. En présence de plusieurs particules identiques ces trajectoires sont emmêlées et contribuent à l'apparition d'un état global dit enchevêtré*. C'est cette simple perte d'identité, qui est la cause de l'interaction d'échange* responsable de la stabilité moléculaire de la matière et des corrélations quantiques* à grande distance.

Le chaos déterministe correspond à l'évolution d'un système déterministe dont la trajectoire de phase n'est pas représentable au moyen de fonctions habituelles. Cette théorie enseigne que le chaos est ce qui n'a d'autre expression que l'existence même. Connaître un processus où le chaos se manifeste, c'est obligatoirement laisser se dérouler tout le processus. Aucun autre langage que celui de l'existence, au fur et à mesure qu'elle se dévoile, ne peut saisir le processus. La notion de trajectoire se dissout faute de représentation.

TRANSCENDANCE

La transcendance est le dépassement hors d'un système de concepts ou d'objets. L'acte de franchir une frontière. Un au-delà. Un terme qui s'oppose à immanence*.

L'usage du terme transcendance a plusieurs significations possibles.

On peut dire que l'esprit* transcende la matière*.

En matière de métaphysique se pose le problème de la relation à Dieu. Pour certains Dieu transcende le monde. À l'inverse, les philosophies de l'immanence, comme le stoïcisme ou le panthéisme de Spinoza maintiennent que Dieu se manifeste dans le monde, et est présent dans celui-ci et dans les choses qui le composent.

Les philosophes ont utilisé le terme transcendance dans de sens variés. En phénoménologie*, le transcendant est ce qui transcende notre propre conscience, c'est-à-dire ce qui est objectif*, par opposition à ce qui est seulement un phénomène de notre conscience. Pour Kant, le transcendant est ce qui est au delà de toute expérience possible, qui dépasse toute possibilité de connaissance. Pour Marx, la transcendance est la capacité humaine de créer son avenir par son travail conscient au présent. Ce travail, pour être conscient, doit être précédé, toujours au présent, d'une réflexion afin d'en déterminer le but.

En mathématiques on définit un nombre transcendant* comme un nombre réel ou complexe qui n'est pas algébrique, c.a.d. qui n'est pas racine d'une équation à coefficients rationnels.

TRANSDUCTION

TRANSPARENCE

TRANSFORMATION DE FOURIER (Cf. FOURIER (TRANSFORMATION DE)).

TRANSFORMATION DU BOULANGER

TRANSISTOR

TRANSITION CRITIQUE (Phénomène critique)

Lors des transitions critiques (transitions de phase), plusieurs caractéristiques manifestent le passage du local au global* relativement à la pertinence des objets décrits et de leur interaction : divergence de la longueur de corrélation (portée des interactions), apparition d'un ordre (mesuré par un paramètre d'ordre qui devient non nul, brisure de symétrie), apparition d'exposants critiques associés à des discontinuités ou des divergences (susceptibilités). Dans le cas de la transition critique du liquide au cristal, par exemple, un ordre ou réseau apparaît, celui de la structure cristalline. Un autre exemple classique est celui de la transition paramagnétique/ferromagnétique

dans un système de spin. Lorsque l'on s'approche de la température critique (température de Curie) le moment magnétique global (qui sert ici de paramètre d'ordre) devient non nul (phénoménologiquement,

TRANSITION DE PHASE

Passage de la matière d'une phase thermodynamique* à une autre. C'est une transition critique*.

Considérons l'exemple bien connu de l'eau et de ses différents aspects. Ainsi, l'eau peut exister dans trois phases, le solide (la glace), le liquide (l'eau !) et le gaz (la vapeur) que l'on peut distinguer quotidiennement au gré des saisons ou dans notre cuisine. Les transitions d'une phase à l'autre sont très familières et correspondent au gel, à l'ébullition et à la sublimation. Ce qui caractérise ces transitions, c'est le changement qualitatif, la discontinuité des propriétés : une petite modification d'un paramètre (comme la température ou la pression) déclenche une modification qualitative spectaculaire. Les transitions de phase de l'eau sont loin d'être un cas isolé et l'on observe une multitude de transitions de phase dans la nature. En particulier, la physique de la matière condensée est très riche d'exemples.

Les transitions de phase de première espèce s'accompagnent d'une variation brusque de la densité et de l'énergie interne* du système et donnent lieu à une absorption ou à un dégagement de chaleur (ex. transition liquide-vapeur, ébullition ; transition solide – liquide, fusion).

Les transitions de phase de seconde espèce ne s'accompagnent pas d'une variation de densité ou d'énergie interne, mais donnent lieu à une variation brusque de certaines propriétés physiques, comme les dérivées de la densité ou de l'énergie interne par rapport à la température et à la pression.

Les transitions de seconde espèce correspondent à une modification de la symétrie de la structure de la matière. La symétrie peut diminuer ou disparaître. Au lieu de parler de modification de symétrie on peut invoquer la variation d'un paramètre d'ordre caractérisant l'ordre* à grande distance.

De bons exemples en sont, le passage d'une phase amorphe à une phase vitreuse, les transitions ordre/désordre dans les alliages, la transition de l'état ferromagnétique* à l'état paramagnétique*, ou le passage de l'hélium liquide à l'état superfluide*.

TRANSITION DE PHASE DE NON EQUILIBRE

Transition créant un état stationnaire* en thermodynamique de non équilibre*, par variation d'un paramètre de contrôle. Dans des systèmes à grand nombre de particules, loin de l'équilibre thermodynamique, transition vers un état stationnaire spatialement ou temporellement cohérent*. Ces transitions sont liées à la perte de stabilité d'un état initial sans structure, et sont le résultat de bifurcations* menant à un état stationnaire. Ces phénomènes se produisent dans des systèmes ouverts et sont dus aux fluctuations induites par les actions extérieures.

Un exemple typique est la génération de lumière cohérente par un laser*. C'est en effet un système hors d'équilibre lié à un réservoir, où les atomes qui rayonnaient indépendamment, se mettent lorsque l'on augmente l'injection de lumière à rayonner en phase. Il y'a là une analogie avec les transitions de phase* de seconde espèce.

Cette analogie existe pour d'autres systèmes physiques (formation des rouleaux* de Bénard), chimiques (auto-oscillations* ou auto-ondulations lors de réactions chimiques), biologiques (transition à un régime rythmique d'activité dans des ensembles neuronaux ; formation de structures non homogènes lors de la morphogénèse*).

L'examen de ces phénomènes dans un cadre unifié, en utilisant la théorie des transitions de phase de Landau et la théorie des vibrations et des ondes non linéaires forme la base de la synergie*.

TRANSITION QUANTIQUE

Saut discontinu d'un système quantique d'un état* à un autre.

La transition quantique la plus importante est celle qui se produit entre deux états d'énergie différente. Dans ce cas cette transition s'accompagne d'absorption ou d'émission d'énergie, ce qui peut se produire avec ou sans rayonnement*. Dans une transition avec rayonnement l'absorption ou l'émission d'énergie se produit sous forme de quanta* du champ électromagnétique*.

En aucun cas la mécanique quantique ne fournit une description continue du passage d'un état à un autre, ne fuisse que parce que l'état étant une évaluation de la connaissance que l'on a du système, la mécanique quantique n'est pas une théorie cognitive détaillée. La mécanique quantique fournit seulement la probabilité de transition entre états. Elle ne fournit aucune description de ce qui pourrait être

considéré comme un mécanisme de passage. C'est peut être une des caractéristiques les plus importantes de la mécanique quantique, que l'on s'en satisfasse ou non. Cela est particulièrement clair dans la description de l'effet tunnel*.

TRANSPOSON

TROU

TROU NOIR

Région de l'espace temps* qui ne peut être vue par un observateur distant parce que la lumière y est piégée par un fort champ gravitationnel. La frontière de cette région est appelée un horizon d'évènements car elle sépare les évènements à l'intérieur du trou des évènements extérieurs. Un trou noir peut se former à la suite d'un effondrement gravitationnel d'une étoile massive.

TROUS D'YOUNG

Rarement une expérience aussi simple aura constitué une expérience cruciale en physique.

Deux trous dans une plaque ou dans un film permettent de séparer en deux un front d'onde, et d'obtenir par recombinaison des ondes partielles, des figures d'intensité périodique, appelées figures d'interférences*. Par diffraction* sur chaque trou, la lumière part dans toutes les directions au delà de l'écran. La rencontre de deux ondes provenant de chacun des trous, donne par superposition sur un écran d'observation un état lumineux qui dépend de la différence de marche des deux rayons.

Ces figures témoignent de l'existence d'un comportement ondulatoire sous jacent.

C'est Fresnel* qui a établi l'existence et la nature des phénomènes d'interférence.

Le plus piquant de cette histoire, quand on sait que l'expérience des trous d'Young est devenue le paradigme même des phénomènes d'interférences, est qu'il semble bien que Young lui même n'a pas vraiment observé les interférences de la lumière provenant des deux trous. Il aurait confondu ces franges avec les systèmes de franges indépendants produit par la diffraction sur chaque trou. Et ceci parce qu'il utilisait des trous trop écartés l'un de l'autre, pour que les ondes

qui arrivent sur l'écran d'observation en un point puissent provenir de la séparation en deux parties d'une même onde. Ceci est dû à ce que les ondes lumineuses réelles sont de longueur finie, comme un train, et que l'on ne peut recombinaison que les éléments séparés d'un même train. Si la distance entre les trous est trop grande les morceaux d'un même train (d'onde) n'arrivent pas ensemble sur l'écran. Ils ratent leur passage et ne se rencontrent pas. Comme Young n'avait pas fait de mesures d'interfranges, ce qui lui aurait permis de découvrir son erreur, fort de sa théorie, il pensait vraiment avoir observé les franges d'interférence

Pour les électrons, dont le comportement ondulatoire a été postulé par de Broglie* dès 1924, et institutionnalisé par la mécanique quantique dans les années 30, l'expérience des trous d'Young n'a été réalisée véritablement que trente ans plus tard par Jean Faget à Toulouse. Exemple de ces expériences de pensée qui hantent la mécanique quantique et dont la réalisation effective tarde.

En 1956, à Toulouse, Jean Faget a réalisé l'expérience des trous d'Young pour les électrons. Elle ne donne des résultats que lorsque des trous de 1mm de diamètre sont à 1 mm l'un de l'autre; Les trous sont à peine séparés. Ceci prouve que pour les électrons comme pour la lumière, l'onde est en fait un train d'onde de durée limitée. Mais alors que pour la lumière cette durée est liée au temps d'émission de la lumière par les atomes des sources, rien de semblable ne peut être évoqué pour les électrons. Un des mystères à verser au dossier de l'onde de de Broglie.

Plus récemment, en 1988, Mlynek à Konstanz, a réalisé l'expérience des trous d'Young avec des atomes, confirmant l'existence du phénomène d'onde de de Broglie pour des objets quantiques aussi imposants.

TUNNEL (Effet)

TURBULENCE

TÜRING (Morphogénèse*selon)

En 1952 Turing publie un article « The chemical basis of morphogenesis ». Il y montre qu'un système chimique ouvert* où se produit une réaction autocatalytique* couplée à de la diffusion (système de réaction diffusion*) est susceptible d'autoorganisation*

spatiale. L'instabilité du système provoque une distribution non homogène de matière, par brisure de symétrie*.

Peu remarqué à l'origine ce travail constitue une avancée fondamentale dans le domaine de la morphogénèse* en accreditant l'idée que la forme naît au sein d'un système à la suite de l'instabilité du mouvement.

UN (L') ET LE MULTIPLE

UNIFICATION DES FORCES (GRANDE)

UNIFICATION DE LA PHYSIQUE

L'histoire de la physique n'est qu'une quête incessante d'unité et la chronique d'unifications réussies. Elle commence par un coup d'éclat anti-aristotélécien dans la réunification de la physique de la terre et de la physique du ciel, ouvrant la voie au mécanisme* universel de Newton*. Maxwell* va non seulement unifier l'électricité et le magnétisme, mais encore l'électromagnétisme* et l'optique* . Sans parler du coup de pouce décisif qu'il donne à l'atomisme* universel en créant la théorie moléculaire statistique des phénomènes thermiques.

Les différentes théories physiques du XX^e siècle font renaître avec éclat l'idéal du réductionnisme*, dont les physiciens des particules élémentaires sont les plus chauds partisans et les théoriciens de l'émergence* les plus ardents détracteurs.

On y voit à l'œuvre l'exploitation systématique des propriétés d'invariance et de symétrie* et les formulations globales* par les méthodes de la géométrie*.

Un des aspects de l'unification de la physique est dans la formulation possible de presque toutes les théories à l'aide d'un principe variationnel* à condition de définir chaque fois une action* ou un lagrangien* correspondants. Presque toutes les théories de la physique peuvent s'exprimer à l'aide d'un principe de moindre action*, à condition de définir chaque fois l'action d'une manière spécifique convenable. La thermodynamique dans la mesure où elle décrit des processus irréversibles* échappe à cette formulation qui gomme la notion de temps.

La théorie de la relativité embrasse d'un seul regard l'espace*, le temps, et les interactions gravitationnelles. La mécanique quantique* fournit un cadre universel pour la description de la matière* et des champs*. Les théories de champs de jauge* permettent

l'unification des forces électromagnétiques et des interactions faibles, suivie de la grande unification* qui inclut les interactions fortes. La théorie des cordes* a pour ambition de rendre compte de tout l'univers.

Les méthodes de la théorie quantique des champs* dans la mesure où elles permettent d'étudier les systèmes à nombre infinis de degrés de liberté s'appliquent aussi bien aux particules élémentaires* qu'aux transitions de phase* unifiant ainsi des domaines à priori fort éloignés.

Et pourtant bien des raccordements souhaités demeurent difficiles sinon impossibles.

Le passage de la mécanique quantique à la mécanique classique demeure semé d'embûches même si la théorie de la décohérence* semble résoudre le problème.

La justification de la mécanique statistique classique à partir de la théorie des systèmes dynamiques* se heurte à bien des difficultés techniques, en particulier en ce qui concerne l'évolution vers l'équilibre et l'irréversibilité*.

La quantification du champ de gravitation, la gravitation quantique, résiste à toutes les tentatives. Il y a entre la relativité générale* et la mécanique quantique* une différence radicale de point de vue qui bloque toutes tentatives de rapprochement.

Les problèmes concrets d'émergence* et de rapports entre le tout et les parties* sont à l'origine de bien de difficultés théoriques.

UNITE

UNITE DE LA CONNAISSANCE

L'unité de la connaissance doit être envisagée d'un double point de vue, diachronique et synchronique.

Diachronique.

Au cours des temps les mêmes problématiques sont présentes. Si les objets de la connaissance se renouvellent et les descriptions changent, les questionnements principaux restent toujours les mêmes. Ceci manifeste la stabilité de l'esprit connaissant qui cherche toujours à analyser le monde selon les mêmes concepts, et à répondre à une seule grande question : « *Qu'est ce qui fait que le monde et les choses du monde sont ce qu'elles sont ?* »

C'est la recherche éternelle de la quiddité* qui engendre toutes les problématiques rivales ou complémentaires.

**L'un, l'être*, la forme*, la matière*.
Hénologie*, ontologie*, morphologie*
Matérialisme***

Et cet incessant jeu des oppositions négations :

**L'un et le multiple*
L'être* et le non être
La forme* et l'informe
Le matériel et le spirituel
L'immanence* et la transcendance***

Et la fascination pour, le néant, le rien*, l'ineffable

Synchronique.

L'unité synchronique de la connaissance s'exprime à travers une vision du monde et son homogénéité conceptuelle. Homogénéité et cohérence souvent dûes à ce qu'à toute image de l'univers, correspond une image de la société, avec sa valorisation propre des pratiques et des raisonnements.

UNITE DE LA SCIENCE

La question de l'unité de la science se situe au carrefour de nombreuses problématiques dont celles de la définition même de la science et celle du réductionnisme* ainsi qu'à la discussion sur l'un et le multiple*. Cette unité est souvent envisagée comme la réduction possible à la physique (physicalisme*) en tant que doctrine générale de la matière*, des forces* et de l'énergie*. Formulés de façon générale bien des concepts de la physique ont en effet valeur universelle.

L'unité de la science est souvent considérée comme le résultat de l'idéal de mathématisation qui s'y déploie. Au début du XVII^e siècle Galilée* proclamait que le Livre de la Nature avait été écrit par Dieu dans le langage des symboles mathématiques et des vérités géométriques, et que les lois de la nature s'exprimaient en terme d'un nombre limité de concepts comme l'étendue, la matière et le mouvement. Le mécanisme* systématisé par Newton* est devenu par la suite le cadre idéal pour l'unification de la philosophie naturelle*. Le XIX^e siècle verra émerger l'énergie comme concept unificateur.

Descartes* et Leibniz* voyaient dans les pouvoirs de la raison humaine les garanties d'une unification de la connaissance que Leibniz

cherchait à formuler à travers la constitution d'un langage algébrique de symboles (*characteristica universalis*).

L'Encyclopédie de Diderot* et d'Alembert* avait pour fonction de révéler l'unité des savoirs humains.

Il en est de même chez Kant* qui ne peut envisager l'unité de la nature mais considère l'unité de la raison humaine, en particulier grâce aux concepts à priori dont elle est le siège. Il promeut l'idée d'une vision du monde ou d'une image du monde* (*Weltanschauung*, *Weltbild*). Cette tradition a influencé Planck* et Mach* qui se sont engagés dans un vif débat sur le caractère précis d'une image scientifique du monde unifiée, débat qui a culminé durant les deux premières décennies du XX^e siècle avec l'œuvre d'Einstein*. Pour Mach, qui adoptait un point de vue phénoménologique, l'unification de la connaissance provenait de l'analyse des idées en sensations élémentaires soumises au principe adaptatif d'économie de la pensée. Planck adoptait un point de vue réaliste qui considérait que la science s'approche graduellement de la réalité et adoptait comme point de vue fondamental les principes thermodynamiques d'énergie* et d'entropie*.

L'unification est un idéal scientifique moteur de nombreuses entreprises du XX^e siècle. C'est le cas pour les développements de la logique formelle* et de l'axiomatisation* par Frege*, Hilbert* et Russell*. Il en est ainsi pour les tentatives d'unification de la relativité générale et de l'électromagnétisme. C'est l'idéal poursuivi par la théorie de l'information*, la cybernétique*, la théorie des catastrophes*, la théorie générale des systèmes dynamiques*, les théories de la complexité*.

Le Modèle Standard des particules et des champs* constitue une vision unifiée de la matière et des rayonnements, qui généralise la démarche initiale de la Mécanique Quantique.

Cet idéal est souvent battu en brèche par des considérations spécifiques à chaque domaine de la science. C'est ainsi pour la biologie moléculaire* qui se trouve en opposition à la doctrine générale de l'auto-organisation* pour l'apparition des formes.

Les courants dominants de la philosophie affirment chacun à leur manière l'unité de la science. Les empiristes logiques*, les membres du Cercle de Vienne* en tête, adoptent la position de Mach* d'une unité de la science sans métaphysique, fondée sur l'unité méthodologique de l'analyse logique du langage. Une unité sous la bannière de la logique, défendue en particulier par Carnap*, qui prônait une construction logique du monde. En 1934 O. Neurath, mu plutôt par des considérations d'interdisciplinarité, lance en 1934 un

mouvement pour l'unité de la science pour encourager la coopération internationale entre les savants et développer un projet d'Encyclopédie Internationale de l'Unité de la Science. De nombreuses activités s'articulèrent autour de ces projets.

Par ailleurs de très nombreux penseurs et savants ont défendu l'unité de la science sous la bannière du matérialisme dialectique*.

Cependant de nouvelles tendances en philosophie des sciences comme celles de Kuhn* ou de Feyerabend donnent une image plutôt pluraliste de la science, en défendant la notion d'incommensurabilité*.

UNITES (cf. Dimension*)

UNIVERS

UNIVERS SUB-QUANTIQUE

Milieu ou niveau profond et caché que les physiciens de Broglie*, Bohm et Vigier nomment : le niveau sub-quantique. L'agencement du milieu sub-quantique donne naissance aux particules atomiques.

Citons de Broglie :

« Ces constatations ont amené la Physique quantique contemporaine à devenir de plus en plus consciente du fait que ce que nous nommons le vide n'est pas du tout un milieu dénué de propriétés physiques, mais bien plutôt une sorte d'immense réservoir (d'énergie, a-t-il écrit puis barré sur son manuscrit) d'où peuvent émerger au niveau microphysique des unités ou des paires corpusculaires et où aussi ces unités et ces paires disparaissant du niveau microphysique peuvent s'engloutir.

Si cette conception est exacte (et il semble bien aujourd'hui qu'elle le soit) il y aurait trois niveaux de la réalité physique.

1° le niveau macrophysique des phénomènes macroscopiques directement observables à notre échelle qui est le domaine propre de la Physique dite "classique";

2° le niveau microphysique ou quantique qui est celui des molécules, des atomes, des noyaux ou plus généralement des particules élémentaires, qui est le domaine propre de la Physique quantique;

3° enfin le niveau le plus profond, hypomicrophysique ou subquantique pourrait on dire, constitué par ce " vide" réservoir immense d'énergie sous jacente dont nous ignorons encore presque tout. Les mots nous trahissent pour désigner ce niveau profond de la réalité: le mot vide ne convient pas du tout car rien ne serait plus plein que ce vide.

L'expression "substratum universel" (ou une autre de ce genre) serait meilleure.

J'emploierai cependant habituellement le mot vide couramment usité, mais vous devez imaginer qu'il doit être mis entre guillemets ("le vide").

Nous ne savons pas si, quand un boson apparaît au niveau microphysique sortant du "vide", il existait déjà dans ce substratum à l'état préformé, ou s'il est "créé" au moment de son apparition. Nous ne savons pas davantage si, quand un boson disparaît du niveau microphysique pour s'engloutir dans le "vide", il subsiste dans ce substratum dans un état indécélable ou s'il est "détruit" au moment de sa disparition. »

Louis de Broglie* Cours professé à la Sorbonne durant l'année scolaire 1957-1958. (Inédit)

« On est évidemment amené à penser que toute particule, même quand elle nous paraît isolée, est en contact avec un milieu subquantique caché qui constitue une sorte d'invisible thermostat.....La particule échangerait ainsi continuellement de l'énergie et de la quantité de mouvement avec ce milieu subquantique..... »

Un grand savant dit tout haut ce que les autres pensent tout bas. C'était l'époque où l'on croyait aux variables cachées*. Mais le problème demeure.

UNIVERSALITE / SPECIFICITE

La conscience et l'identification d'universalité est certainement une des expériences cognitives les plus troublantes pour l'homme. Elle débute par la reconnaissance de soi-même dans l'autre. Elle se dégage souvent avec difficulté de l'aspect à priori spécifique de toutes choses.

C'est ainsi que l'atomisme physico-chimique et le primat conceptuel du paradigme force-énergie produisent un préjugé général en faveur d'une vision du monde où règne la spécificité. Les choses et les phénomènes sont ce qu'ils sont par suite de la nature des forces et des interactions en présence. Tout une part et non la moindre du développement scientifique contemporain consiste à vouloir relier les phénomènes aux interactions, en révélant la particularité des uns en fonction de la spécificité des autres. Décryptage laborieux et lent, certain de produire un résultat, mais incertain quant à l'apparition du sens.

La spécificité est une conception relevant d'une approche locale*, analytique* et quantitative de la réalité. Une approche de type

syntactique*, alors que l'universalité se fonde sur une approche sémantique*, globale* et qualitative.

Certains faits universels de la physique s'inscrivent dans l'existence de constantes universelles*. Le nombre d'Avogadro* révèle la réalité atomique. La constante de Planck* traduit la réalité quantique qui embrasse l'univers tout entier de par les propriétés universelles du rayonnement du corps noir* (loi de Kirchhoff*, rayonnement résiduel*). L'universalité de la loi de fluctuation-dissipation* quantique promet de même l'idée d'un modèle d'oscillateur harmonique universel.

Les phénomènes de transition présentent souvent certaines caractéristiques universelles comme c'est le cas pour la transition au chaos (théorie de Feigenbaum) ou pour les lois d'échelle* dans les transitions de phase*.

Il existe un certain nombre de programmes scientifiques cherchant à promouvoir explicitement des caractéristiques universelles. Toutes les théories de la physique peuvent s'exprimer à l'aide d'un principe de moindre action*, à condition de définir chaque fois l'action d'une manière spécifique convenable. L'emploi du principe d'entropie maximum de Jaynes* pour la détermination de distributions de probabilité est un principe universel.. La théorie des catastrophes* de Thom* a de semblables visées universalistes. C'est aussi l'objectif des théories unitaires qui cherchent à réaliser l'unification des forces*.

En biologie la problématique prend un caractère dialectique dramatique, car l'être vivant présente à la fois des caractéristiques universelles : la vie, en tant que propriété commune à tous les êtres vivants, et des caractéristiques hautement spécifiques qui donnent à la vie son caractère unique dans la nature et singularisent les différents êtres vivants en faisant jouer un rôle fondamental à l'unique et à l'individu.

On peut s'interroger pour savoir si la spécificité est un avantage ou un désavantage dans l'évolution*, car elle s'oppose à la stabilité structurelle*, tout en créant grâce à la diversité une adaptabilité de l'espèce ce qui restaure en un sens une stabilité.

UNIVERSAUX

Du latin -universalis- général. Désigne les concepts et les idées en général, par opposition aux objets particuliers. Le mode d'existence des universaux est au cœur de toutes les démarches épistémologiques

qui envisagent le rapport entre les mots*, les noms* , les concepts* et les choses*.

Trois attitudes principales se dégagent.

Les universaux existent objectivement, en quelque sorte avant les choses elles mêmes. C'est une forme extrême de réalisme* qui prend sa source dans la théorie des idées de Platon.

Les universaux existent dans les choses. Réalisme modéré adopté par Thomas d'Aquin, à la suite d'Aristote pour lequel la forme n'existe pas en dehors des choses et a besoin de la matière pour apparaître. Les universaux sont des "Comme ça".

Les universaux n'apparaissent qu'après les choses et n'existent que dans l'esprit. Ce sont des "Comme si*", construction de l'esprit pour le conceptualisme* ou simples mots pour le nominalisme*.

UNUS MUNDUS

UTOPIE

VALENCE

Nombre maximum de liaisons chimiques* simples auxquelles peut participer un atome. Ce nombre vaut: 1 pour l'hydrogène, 4 pour le carbone, 3 pour l'azote et 2 pour l'oxygène.

La chimie quantique*, par son étude des propriétés quantiques des atomes et des molécules, rend remarquablement compte du concept de valence, responsable de la classification périodique des éléments* de Mendeleev*.

VALEUR LOGIQUE

La valeur logique d'une proposition* est une qualité attachée à la proposition, exprimant sa véracité ou sa fausseté, sa nécessité ou sa possibilité. Dans les logiques bivalentes seuls le vrai et le faux sont retenus, et représentés symboliquement par 1 et 0. Les valeurs logiques sont soit décidées a priori soit calculées pour les propositions résultant de l'application d'opérations logiques (logique propositionnelle*). La situation est analogue à celle de la théorie des probabilités* où certaines probabilités sont calculées à partir de probabilités données a priori. Logique propositionnelle et calcul des probabilités ont la même structure formelle d'algèbre de Boole*

VALEUR PROPRE (Cf. Vecteur propre*)

VAN DER WAALS (FORCES DE)

VARIABLES CACHEES

Attributs* locaux hypothétiques de corpuscules microphysiques (subquantiques) dont le comportement statistique, dans le sens d'une mécanique statistique* classique, serait équivalent à la mécanique quantique*. L'absence d'attributs en mécanique quantique et l'ensemble des faits expérimentaux qui militent pour cette absence d'attributs, en particulier les paradoxes auxquels donnent lieu les tentatives de réintroduire des attributs, incitent à considérer la non existence de variables cachées locales, faisant de la mécanique quantique une théorie de la réalité ultime. L'expérience d'Aspect* et la non vérification des inégalités de Bell* plaide pour l'absence de variables cachées au sens ordinaire, c.a.d. non-locales*. Depuis le célèbre débat entre Einstein* et Bohr* à propos de l'article EPR*, la polémique reste toujours ouverte, tout en devenant de plus en plus subtile. Il n'en reste pas moins que des expériences comme celles d'Aspect* tranchent en faveur de la théorie des probabilités quantiques* au dépens de la théorie des probabilités classiques*, dans le calcul des résultats de mesure.

Les variables cachées révéleraient un univers subquantique* dont tous les détails seraient complètement décrits. Aucune description de ce type n'existe. Bell* a montré de manière formelle que toute théorie objective donnant les mêmes prédictions expérimentales que la M.Q. serait nécessairement non locale. Elle prendrait simultanément en compte tous les éléments de l'univers, y compris nous mêmes, et conduirait à de curieux paradoxes logiques d'auto-référence*. Ceci ne relève pas de la physique expérimentale.

VARIATIONNEL (CALCUL)

Partie des mathématiques qui généralise la théorie élémentaire de l'extremum des fonctions*, en considérant l'extremum des fonctionnelles*.

VARIATIONNELS (PRINCIPES) Cf. Idées de la physique*)

Toute théorie s'exprime en fin de compte par des conditions locales imposées aux phénomènes sous forme d'équations différentielles* qui les déterminent totalement. C'est cette détermination qui permet de remplacer la description locale par une

description globale sous la forme d'un principe d'extrémisation, dit principe variationnel, où une fonction spécifiquement définie atteint son minimum ou son maximum. Ces principes formulés au XVIII^e siècle, en particulier le principe de moindre action* de Maupertuis, dans une atmosphère métaphysique, ont pu laisser croire à un rétablissement de la finalité* dans une simple transformation mathématique où la détermination totale ne laisse aucune place à ce concept. Il n'en est rien.

La formulation d'une théorie à l'aide d'un principe variationnel présente de nombreux avantages. En particulier cette formulation explicite les invariances de la théorie, car l'extremum d'une fonction scalaire ne dépend pas des coordonnées dans lesquelles la quantité est mesurée.

En particulier dans le cas de la mécanique un principe variationnel formule une propriété que réalise la trajectoire réelle du mouvement sous l'influence des forces réelles et la distingue des autres trajectoires cinématiquement possibles. Les principes variationnels de la mécanique s'expriment sous une forme facilement transposable à d'autres domaines de la physique, ce qui en constitue l'importance considérable pour la physique théorique*.

L'avantage de la formulation de la mécanique à l'aide d'un principe variationnel au lieu des équations du mouvement est l'exclusion à priori de toutes les réactions inconnues des liaisons du système.

Un principe variationnel exprime que pour le mouvement réel une certaine fonction des caractéristiques cinématiques et dynamiques du système possède un extremum (minimum ou maximum). Différents principes variationnels se distinguent par la nature de cette fonction.

D'une manière générale les principes variationnels s'expriment comme un principe de moindre action* à condition de définir chaque fois ce que l'on nomme action*. Dans la théorie de Hamilton* on compare des mouvements s'effectuant dans des temps égaux selon une action* qui est l'intégrale* par rapport au temps de la différence entre l'énergie cinétique* et l'énergie potentielle* du système, la fonction de Lagrange ou lagrangien*. Dans la théorie de Maupertuis*-Lagrange*, on compare les mouvements d'un système conservatif avec la même énergie cinétique initiale, selon une action* qui est l'intégrale par rapport au temps du double de l'énergie cinétique du système,

La formulation d'une théorie à l'aide d'un principe variationnel, de par son caractère global, a pour effet de gommer le rôle du temps, faisant ressortir encore plus en mécanique classique la symétrie de la théorie par rapport au paramètre temps. Cela a pour conséquence les

difficultés non surmontées de formulation de la thermodynamique, siège des processus irréversibles*, à l'aide de principes variationnels.

Le théorème de Noether* (1918) montre le rôle fondamental que joue la théorie des groupes* de transformation et de leurs invariants dans le calcul variationnel et la physique.

VARIETE

Objet géométrique satisfaisant à certaines conditions topologiques*.

VECTEUR

Ensemble de nombres rangés dans un certain ordre, avec définition de la somme de deux vecteurs comme l'ensemble des nombres obtenus en additionnant les deux valeurs de chaque rang.

Un vecteur est une matrice* à une colonne.

On définit aussi le produit scalaire* de deux vecteurs

Un point d'un plan définit un vecteur par la donnée de l'abscisse et de l'ordonnée selon deux axes perpendiculaires. Un vecteur dans le plan est un nombre complexe*.

Une fonction* peut être considérée comme un vecteur d'une infinité de nombres.

VECTEUR PROPRE

Un vecteur propre d'un opérateur* est un vecteur* qui reste invariant sous l'action de cet opérateur à un facteur multiplicateur près. Ce facteur numérique est appelé valeur propre. L'ensemble des vecteurs propres d'un opérateur définit cet opérateur et en révèle la structure, en formant une base* de l'espace vectoriel dans laquelle cet opérateur se représente d'une manière simple à l'aide des valeurs propres.

La mécanique quantique stipule que les observables sont représentés par des opérateurs, et que les seules valeurs observables sont les valeurs propres de cet opérateur dont les vecteurs propres constituent les états possibles du système.

VERITE

Selon Quine* « La vérité est une question de réalité*, ce qui signifie que si un énoncé est vrai, c'est parce que la réalité le rend vrai. Ce n'est pas la phrase qui est vraie mais la réalité qui la rend vraie ». En écho à Aristote* : « Dire de ce qui est qu'il n'est pas, ou de ce qui

n'est pas qu'il est, c'est faux ; tandis que dire de ce qui est qu'il est, ou de ce qu'il n'est pas qu'il n'est pas, c'est vrai ».

La vérité est donc ce que le sujet connaissant appréhende de la réalité et attribue au monde objectif, la correspondance entre le monde et sa représentation (rei et intellectu). Cette notion va donc varier selon les systèmes philosophiques (Cf. Modernité*- Origines de la). Elle sera la propriété constante et absolue des objets idéaux chez Platon* ou bien l'accord de la pensée avec elle-même, avec ses formes a priori* chez Kant*. Selon Hegel la vérité est un processus dialectique de développement de la connaissance. Pour les empiristes* elle correspond aux sensations du sujet (Hume*, Russell*), ou aux succès de son action (pragmatisme*), ou enfin à la concordance de ses sensations (Mach*). Les néo positivistes considèrent la vérité comme un accord des propositions de la science avec l'expérience sensible. Pour un conventionnaliste* comme Poincaré la vérité n'est qu'affaire de convention. Pour les existentialistes* c'est une forme d'état psychologique de la personnalité.

Tout cela paraît simple et n'en référer qu'au bon sens. Tôt dans le développement de la logique et des mathématiques modernes, logiciens et philosophes se sont rendu compte que le prédicat de vérité est plus problématique que ces trivialités ne nous le font penser. Il existe toute une famille de paradoxes, dont le plus connu est le paradoxe du menteur*, où la vérité est soit indécidable soit contradictoire.

C'est pourquoi le logicien polonais Alfred Tarski* a donné une définition de la vérité qui évite les difficultés logiques. Au cours de sa définition, Tarski a démontré le théorème de non-définissabilité* de la vérité: on ne peut pas définir dans le langage de l'arithmétique la vérité des énoncés de ce langage. Ce théorème s'applique en premier lieu aux langages naturels, qui contiennent les ressources expressives pour faire référence à leurs propres expressions.

VERITE (EN SCIENCE)

VIDE

Le mot Vide semble dans son emploi ambigu et labile renvoyer à une catégorie conceptuelle bien définie sans pour autant représenter nécessairement toujours la même chose. Là réside sans doute la cause de ces renversements paradoxaux du discours qui en voulant envisager

la chose, constate que selon les cas le Vide est vide ou le Vide est plein. Ainsi le concept de Vide contient un élément essentiel de relativité, ce qui le distingue en général du concept de Rien* ou de Néant*.

De ce point de vue le Vide semble désigner tout ce qui se trouve dans une situation normale*, marquant ainsi l'absence de caractères distinctifs ou d'évènements exceptionnels. A ce titre il est absence de forme* et de nouveauté, absence de dissymétrie et d'inhomogénéité, absence de figure et d'image*. Dans le taoïsme chinois, le vide est clairement caractérisé par l'indifférenciation, ce qui lui confère un rôle fonctionnel, car c'est grâce à lui que le plein du réel peut se manifester.

Le concept de vide, tout comme celui de normalité*, renvoie en permanence à une situation considérée comme la plus naturelle, la plus fréquente, la plus probable dans les circonstances données. Le normal face au pathologique!

Que ce soit le vide des atomistes ou le vide des cosmologistes, on désigne toujours ce qui est le plus probable, considérant la matière ou l'univers comme ce qui est le plus improbable. C'est bien ainsi que l'entend Siger de Brabant au XIIIème siècle quand il s'étonne : " Pourquoi y a t il quelque chose plutôt que rien?", considérant le quelque chose comme anormal par rapport au rien. C'est bien ce que pensait Aristote, pour qui la matière (hylé) est vide de forme et inaccessible, mais partout présente potentiellement, en attente de forme, et de ce fait plus probable dans le monde que le vide (rien) ou la forme.

La théorie quantique se conforme à ce point de vue en appelant Vide, l'état fondamental* de tout système microphysique, en particulier lorsqu'il s'agit de champs. Lapsus révélateur, certains physiciens appellent l'état fondamental, état normal. Le Vide Quantique* est l'état sans excitations, mais étant un simple état de repos du système, il n'est pas rien, car le message central de la théorie quantique est l'impossibilité d'un état à énergie nulle, ce qui éliminerait le hasard par l'immobilité absolue.

La physique quantique ramène l'étude de tout objet quantique , les champs en particulier, à la genèse d'excitations à partir du Vide Quantique* considéré comme origine. Toute la théorie quantique des champs* passe son temps à définir et à redéfinir le Vide lors du changement des conditions physiques (modification des conditions matérielles et des types d'interactions). C'est une chronique des changements de Vide, dont l'effet Casimir* est le paradigme universel. La physique quantique met pleinement en lumière le rôle fonctionnel du Vide Quantique, comme source théorique des manifestations du

réel. Elle rejoint par là la conception néoplatonicienne de l'Un*. Les discours sur l'Un* et sur le Vide sont bien souvent indiscernables. Tout autant d'ailleurs que ceux sur le Vide et la Matière* (Matière première*. Matière sensible et matière intelligible).

Le problème du Vide est avant tout une question philosophique* et métaphysique*, celle du rapport entre les qualités* (les propriétés) et la substance* (la chose*, l'objet*). De même on prétend souvent que le problème fondamental de la philosophie est celui des rapports de l'esprit* et de la matière*. Ces problèmes s'inscrivent dans une problématique générale dont les illustrations historiques se diversifient depuis la conception aristotélicienne de l'acte* et de la puissance* jusqu'à la distinction kantienne du phénomène* et du noumène*.

Pour la pensée contemporaine, le Vide n'est pas l'extérieur de la Matière. C'est l'état de base dont la matière émerge sans couper son cordon ombilical. Il n'y a pas d'autonomie de la matière par rapport au vide. Le vide n'est pas séparable de la matière. La matière comporte le vide en son sein. Le problème du vide appartient à la métaphysique, connaissance fondamentale de l'étant* comme tel et en totalité.

VIDE (Encyclopédie.)

VUIDE, s. m. (Phys. & Métaph.) espace destitué de toute matiere. Voyez Espace & Matiere.

Les philosophes ont beaucoup disputé dans tous les tems sur l'existence du vuide, les uns voulant que tout l'univers fût entierement plein, les autres soutenant qu'il y avoit du vuide. Voyez Plein.

Les anciens distinguoient le vuide en deux especes: vacuum coacervatum & vacuum disseminatum; ils entendoient par le premier un espace privé de toute matiere, tel que seroit l'epace renfermé par les murailles d'une chambre, si Dieu annihiloit l'air & tous les autres corps qui y sont. L'existence de ce vuide a été soutenue par les Pythagoriciens, par les Epicuriens & par les atomistes ou corpusculaires, dont la plûpart ont soutenu que le vuide existoit actuellement & indépendamment des limites du monde sensible; mais les philosophes corpusculaires de ces derniers tems, lesquels admettent le vacuum coacervatum, nient cette assertion, entant que ce vuide devoit être infini, éternel & non créé. Voyez Univers.

Suivant ces derniers, le vacuum coacervatum, indépendamment des limites du monde sensible, & le vuide que Dieu feroit en annihilant les corps contigus, ne seroit qu'une pure privation ou néant. Les dimensions de l'espace qui, selon les premiers, étoient quelque chose de

réel, ne sont plus, dans le sentiment des derniers, que de pures privations, que la négation de la longueur, de la largeur & de la profondeur qu'auroit le corps qui rempliroit cet espace. Dire qu'une chambre dont toute la matiere seroit annihilée, conserveroit des dimensions réelles, c'est, suivant ces philosophes, dire cette absurdité, que ce qui n'est pas corps, peut avoir des dimensions corporelles.

Quant aux Cartésiens, ils nient toute espece de vacuum coacervatum, & ils soutiennent que si Dieu annihiloit toute la matiere d'une chambre, & qu'il empêchât l'introduction d'aucune autre matiere, il s'ensuivroit que les murailles deviendroient contiguës, & ne renfermeroient plus aucun espace entr'elles; ils prétendent que des corps qui ne renferment rien entr'eux, sont la même chose que des corps contigus; que dès qu'il n'y a point de matiere entre deux corps, il n'y a point d'étendue qui les sépare. Etendue & corps, disent - ils, signifient la même chose. Or s'il n'y a point d'étendue entre deux corps, ils sont donc contigus, & le vuide n'est qu'une chimere; mais tout ce raisonnement porte sur une méprise, en ce que ces philosophes confondent la matiere avec l'étendue. Voyez Etendue & Espace.

Le vuide disséminé est celui qu'on suppose être naturellement placé entre les corps & dans leurs interstices. Voyez Pore.

C'est sur cette espece de vuide que disputent principalement les philosophes modernes. Les corpusculaires le soutiennent, & les Péripatéticiens & les Cartésiens le rejettent. Voyez Corpusculaires, Cartésianisme, &c.

Le grand argument des Péripatéticiens contre le vuide disséminé, c'est qu'on voit différentes sortes de corps qui se meuvent dans certains cas, d'une maniere contraire à leur direction & inclination naturelle, sans autre raison apparente que pour éviter le vuide; ils concluent de - là que la nature l'abhorre, & ils font une classe de mouvemens qu'ils attribuent tous à cette cause. Telle est, par exemple, l'ascension de l'eau dans les seringues & dans les pompes.

Mais comme le poids & l'élasticité de l'air ont été prouvés par des expériences incontestables, tous ces mouvemens sont attribués avec raison à la pression causée par le poids de l'air. Voyez Seringue, Air, Pompe, Ventouse, &c.

Les Cartéfiens ne nient pas seulement l'existence actuelle du vuide, mais sa possibilité, & cela sur ce principe que l'étendue étant l'essence de la matiere ou des corps, tout ce qui est étendu, est matiere, l'espace pur & vuide qu'on suppose étendu, doit être matériel, selon eux. Quiconque, disent - ils, admet un espace vuide, conçoit des dimensions dans cet

espace, c'est à - dire une substance étendue, & par conséquent il nie le vuide en même tems qu'il l'admet.

D'un autre côté, les physiciens corpusculaires prouvent par plusieurs considérations, non - seulement la possibilité, mais l'existence actuelle du vuide; ils la déduisent du mouvement en général, & en particulier du mouvement des planetes, des cometes, de la chute des corps, de la raréfaction & de la condensation, des différentes gravités spécifiques des corps, & de la divisibilité de la matiere.

I. On prouve d'abord que le mouvement ne sauroit être effectué sans vuide. Voyez Mouvement. C'est ce que Lucrece a si bien rendu dans son poëme.

Principium quoniam cedendi nulla daret res; Undique materies quondam stipata fuisset.

La force de cet argument est augmentée par les considérations suivantes.

1°. Que tout mouvement doit se faire en ligne droite ou dans une courbe qui rentre en elle - même, comme le cercle & l'ellipse, ou dans une courbe qui s'étende à l'infini, comme la parabole, &c.

2°. Que la force mouvante doit toujours être plus grande que la résistance.

Car de - là il suit qu'aucune force même infinie ne sauroit produire un mouvement dont la résistance est infinie, & par conséquent que le mouvement en ligne droite ou dans une courbe qui ne rentre point en elle - même, seroit impossible dans le cas où il n'y auroit point de vuide, à cause que dans ces deux cas la masse à mouvoir & par conséquent la résistance doit être infinie. De plus, de tous les mouvemens curvilignes, les seuls qui puissent se perpétuer dans le plein, sont ou le mouvement circulaire autour d'un point fixe, & non le mouvement elliptique, ou d'une autre courbure, ou le mouvement de rotation d'un corps autour de son axe, pourvû encore que le corps qui fait sa révolution, soit un globe parfait ou un sphéroïde ou autre figure de cette espece; or de tels corps ni de telles courbes n'existent point dans la nature: donc dans le plein absolu il n'y a point de mouvement: donc il y a du vuide.

II. Les mouvemens des planetes & des cometes démontrent le vuide. « Les cieux, dit M. Newton, ne sont point remplis de milieux fluides, à moins que ces milieux ne soient extrêmement rares: c'est ce qui est prouvé par les mouvemens réguliers & constans des planetes & des cometes qui vont en tout sens au - travers des cieux. Il s'ensuit évidemment de - là que les espaces célestes sont privés de toute résistance

sensible & par conséquent de toute matiere sensible; car la résistance des milieux fluides vient en partie de l'attrition des parties du milieu, & en partie de la force de la matiere qu'on nomme sa force d'inertie. Or cette partie de la résistance d'un milieu quelconque, laquelle provient de la ténacité, du frottement ou de l'attrition des parties du milieu, peut être diminuée en divisant la matiere en des plus petites parcelles, & en rendant ces parcelles plus polies & plus glissantes. [p. 573] Mais la partie de la résistance qui vient de la force d'inertie, est proportionnelle à la densité de la matiere, & ne peut - être diminuée par la division de la matiere en plus petites parcelles, ni par aucun moyen que par la densité du milieu; & par - conséquent si les espaces célestes étoient aussi denses que l'eau, leur résistance ne seroit guere moindre que celle de l'eau; s'ils étoient aussi denses que le vifargent, leur résistance ne seroit guere moindre que celle du vif - argent; & s'ils étoient absolument denses ou pleins de matiere sans aucun vuide, quelque subtile & fluide que fût cette matiere, leur résistance seroit plus grande que celle du vif argent. Un globe solide perdrait dans un tel milieu plus de la moitié de son mouvement, en parcourant trois fois la longueur de son diametre, & un globe qui ne seroit pas entierement solide, telles que sont les planetes, s'arrêteroît en moins de tems. Donc pour assurer les mouvemens réguliers & durables des planetes & des cometes, il est absolument nécessaire que les cieux soient vuides de toute matiere, excepté peut - être quelques vapeurs ou exhalaisons qui viennent des atmospheres de la terre, des planetes & des cometes, & les rayons de lumiere. Voyez Résistance, Milieu, Planete, Comete .»

III. Newton déduit encore le vuide de la considération du poids des corps. « Tous les corps, dit - il, qui sont ici - bas pesent vers la terre, & les poids de tous ces corps, lorsqu'ils sont à égale distance du centre de la terre, sont comme les quantités de matiere de ces corps. Si donc l'éther ou quelqu'autre matiere subtile étoit entierement privée de gravité, ou qu'elle pesât moins que les autres à raison de sa quantité de matiere, il arriveroit, suivant Aristote, Descartes & tous ceux qui veulent que cette matiere ne differe des autres corps que par le changement de sa forme, que le même corps pourroit, en changeant de forme, être graduellement changé en un corps de même constitution que ceux qui pesent plus que lui à raison de leur quantité de matiere, & de même les corps les plus pesans pourroient perdre bar degrés leur gravité en changeant de forme, ensorte que les poids dépendroient uniquement des formes des corps, & changeroient en même tems que ces formes, ce qui est contraire à toute expérience ». Voyez Poids.

IV. La chûte des corps prouve encorè, suivant M. Newton, que tous les espaces ne sont pas également pleins. « Si tous les espaces étoient

également pleins, la gravité spécifique du fluide dont l'air seroit rempli, ne seroit pas moindre que la gravité spécifique des corps les plus pesans, comme le vif - argent & l'or, & par conséquent aucun de ces corps ne devroit tomber; car les corps ne descendent dans un fluide que lorsqu'ils sont spécifiquement plus pesans que ce fluide. Or si, par le moyen de la machine pneumatique, on parvient à tirer l'air d'un vaisseau au point qu'une plume y tombe aussi vîte que l'or dans l'air libre, il faut que le milieu qui occupe alors le vaisseau soit beaucoup plus rare que l'air. Voyez Chûte. Puis donc que la quantité de matiere peut être diminuée dans un espace donné par la raréfaction, pourquoi cette diminution ne pourroit - elle pas aller jusqu'à l'infini? Ajoutez à cela que nous regardons les particules solides de tous les corps comme étant de même densité, & comme ne pouvant se raréfier qu'au moyen des pores qui sont entr'elles, & que de - là le vuide suit nécessairement. Voyez Raréfaction, Pore & Particule .»

« Les vibrations des pendules prouvent encore l'existence du vuide; car puisque ces corps n'éprouvent point de résistance qui retarde leur mouvement ou qui raccourcissent leurs vibrations, il faut qu'il n'y ait pas de matiere sensible dans ces espaces, ni dans les interstices des particules de ces corps ». Voyez Pendule.

Quant à ce que Descartes a dit, que la matiere peut être atténuée au point de rendre sa résistance insensible, & qu'un petit corps en en frappant un grand ne fauroit ni lui résister, ni altérer son mouvement, mais qu'il doit retourner en arriere avec toute sa force; c'est ce qui est contraire à l'expérience. Car Newton a fait voir que la densité des fluides étoit proportionnelle à leur résistance à très peu de chose près, & c'est une méprise bien grossiere que de croire que la résistance qu'éprouvent les projectiles est diminuée à l'infini, en divisant jusqu'à l'infini les parties de ce fluide. Puisqu'au contraire il est clair que la résistance est fort peu diminuée par la sous-division des parties, & que les forces résistantes de tous les fluides sont à - peu - près comme leurs densités, princip. l. II. prop. 38. & 40. Et pourquoi la même quantité de matiere divisée en un grand nombre de parties très - petites, ou en un petit nombre de parties plus grandes ne produiroit - elle pas la même résistance? S'il n'y avoit donc pas de vuide, il s'en suivroit qu'un projectile mû dans l'air, ou même dans un espace purgé d'air, éprouveroit autant de résistance que s'il se mouvoit dans du vifargent. Voyez Projectile.

VI. La divisibilité actuelle de la matiere & la diversité de la figure de ses parties prouve le vuide disséminé. Car dans la supposition du plein absolu, nous ne concevons pas plus qu'une partie de matiere puisse être

actuellement séparée d'une autre, que nous ne pouvons comprendre la division des parties de l'espace absolu. Lorsqu'on imagine la division ou séparation de deux parties unies, on ne sauroit imaginer autre chose que l'éloignement de ces parties à une certaine distance. Or de telles divisions demandent nécessairement du vuide entre les parties. Voyez Divisibilité.

VII. Quant aux figures des corps, elles devroient toutes être dans la supposition du plein, ou absolument rectilignes, ou concaves - convexes, autrement elles ne pourroient jamais remplir exactement l'espace; or tous les corps n'ont pas ces figures.

VIII. Ceux qui nient le vuide supposent ce qu'il est impossible de prouver, que le monde matériel n'a point de limite. Voyez Univers.

Puisque l'essence de la matiere ne consiste pas dans l'étendue, mais dans la solidité ou dans l'impénétrabilité; on peut dire que l'univers est composé de corps solides qui se meuvent dans le vuide: & nous ne devons craindre en aucune maniere que les phénomènes, qui s'expliquent dans le système du plein, se refusent au système de ceux qui admettent le vuide, les principaux de ces phénomènes, tels que le flux & reflux, la suspension du mercure dans le barometre, le mouvement des corps célestes, de la lumiere, &c. s'expliquent d'une maniere bien plus satisfaisante dans ce dernier système. Voyez Flux, &c.

VIDE DE DIRAC

L'équation de Dirac* possède des solutions à énergie négative. Ainsi dans le cas de l'hydrogène ce sont des solutions à énergie négative pour l'électron.

Quel sens donner à ces solutions ?

Etant donné la relation entre l'énergie et le temps, on peut être tenté de dire que l'électron remonte le temps. Ce qui rend sceptique.

Dirac a brillamment résolu ce problème en disant qu'il s'agit là en fait d'une antiparticule* qui se déplace normalement dans le sens du temps. Cette antiparticule a été détectée : le positron*.

Dirac supposait que tous les états à énergie négative étaient occupés. Le passage d'un électron d'un état à énergie négative à un état à énergie positive par absorption d'un photon* et le passage inverse s'interprètent comme la formation d'une paire électron – positron et l'annihilation d'une telle paire. Le positron est un trou dans la mer des électrons à énergie négative, le vide de Dirac. Ce trou a une charge positive et une énergie positive.

Le vide de Dirac est le premier exemple historique de création et d'annihilation de particules.

On a voulu voir dans l'existence du vide de Dirac une justification du caractère physique du paramètre temps de la physique théorique. En fait ceci ne donne pas une interprétation physique du paramètre temps, et ne fait que confirmer la grande cohérence de la constitution de la physique théorique.

VIDE DE FULLER RINDLER

VIDE DE MINKOWSKI

VIDE (Histoires de)

L'histoire du concept de vide* s'entrelace pendant vingt cinq siècles avec celles des concepts d'espace et d'atomes, de continu* et de discontinu.. L'histoire du vide apparaît en filigrane dans l'histoire de l'atomisme. Elle peut se résumer en une longue opposition entre celui qui y croyait et celui qui n'y croyait pas. Comme Aristote* n'y croyait pas les cultures médiévales n'y ont pas cru, islam et chrétienté confondus.

Nous essayerons d'employer le mot vide pour désigner le rien* et le mot éther* pour désigner le vide plein, ou tout au moins vide de matière ordinaire ou de lumière. Seul le contexte dira si notre vide est vide ou plein.

Parménide* n'y croyait pas. On ne pourra jamais par la force prouver que le non être a l'être.

Empédocle n'y croyait pas non plus Il pensait qu'en plus de quatre éléments fondamentaux, le feu, l'eau, l'air et la terre, un cinquième l'éther emplissait l'univers.

Leucippe et Démocrite* y croyaient. Etre et non être ont également droit de cité.

Platon* est de leur avis, mais le non être n'est pas le rien du tout, le vide-kénon-mais un réceptacle et un matériau qui sert d'intermédiaire entre le sensible et l'intelligible, et qu'il nomme l'étendue-chora. Platon inaugure la tradition occidentale de la géométrisation de l'espace et n'admet pas le vide des atomistes. Il matérialise l'étendue, identifiant dans le Timée, son œuvre phare, la matière première et l'étendue. L'étendue n'est donc pas l'espace vide, mais la matière permanente de l'univers. Une matière première sans forme qui baigne les éléments formés de figures polyédriques. Comme il y a cinq polyèdres réguliers et que Platon ne connaît que quatre éléments : le feu, l'eau, l'air, la terre la tentation est grande de considérer une cinquième substance (la quintessence*) constituée de dodécaèdres pentagonaux. L'éther, l'Ame du monde.

Aristote* prouvait que l'on ne pouvait pas croire au vide Et il fut cru pendant quinze siècles. Toute la pensée d'Aristote est liée à l'analyse du mouvement et du changement. Il y a des arguments contre le vide : dans le vide rien ne peut entretenir le mouvement, dans le vide en l'absence de résistance la vitesse pourrait devenir infinie, le vide étant homogène on ne comprend pas comment le mouvement peut se produire dans une direction privilégiée. S'il n'ya pas de vide séparant les corps, il faut que d'une certaine façon les corps occupent tout l'espace. Mais à la différence de Platon qui identifie la matière et l'étendue dans une théorie de l'apparition des formes sensibles à partir des formes intelligibles préexistantes, Aristote développe une théorie de la matière comme substrat du changement. Mais la hylé d'Aristote n'est pas la chora de Platon. Ce n'est pas une chose perceptible, ni une réalité objective. Elle est avant tout un concept nécessaire à la compréhension du réel. La matière (hylé) et la forme (eidos ou morphé) sont avec la privation les principes qui coexistent dans la substance* (ousia) mais ne peuvent être isolés que par l'abstraction. La matière est en puissance de la forme et la forme actualise la matière. L'existence de la matière première est un élément essentiel de la philosophie naturelle d'Aristote. La matière première d'Aristote en tant que potentialité est analogue au vide quantique*. La pensée d'Aristote trouvera de nombreux relais jusqu'au Moyen-âge et Descartes*.

En face de l'atomisme antique, les Stoïciens* représentent un grand courant de l'histoire des idées. Ils élaborent une conception dynamique du continu en anticipant bien souvent l'approche continuiste qui dominera les idées scientifiques de Descartes*, Huygens*, Faraday* et Maxwell*. Physique du continu qui n'admet pas d'espace vide à l'intérieur du cosmos mais le rejette à l'extérieur.. Par contre cette physique emplit le cosmos d'une substance élastique, un mixte de feu et d'air, qui assure la cohésion du monde : le pneuma. Ce n'est pas une substance passive comme la quintessence* de Platon ou l'éther d'Aristote. C'est un principe actif subtil qui pénètre tout. Un principe intelligent. Logos* et Dieu*. Aussi selon Cléomède, le vide n'est pas rien du tout. Il le regarde comme une certaine substance.

Fondateur du néoplatonisme*, Plotin* se démarque à la fois de Platon, d'Aristote et des Stoïciens. Le vide n'existe pas, mais sa théorie de la matière première, à force d'incorporalité, en fait un véritable non-être. La matière première comme pur intelligible.

Saint Augustin* fortement influencé par le néo-platonisme* et Plotin* est hésitant en traitant d'un néant qui tout à la fois existe et n'existe pas, pour qualifier la matière première. Jusqu'à la fin du

XIIème siècle, celui des Pères de l'Eglise qui aura mission de renseigner les chrétiens sur la matière première ce sera Saint Augustin. Il transmettra la notion de matière première néo platonicienne et non de matière première aristotélicienne.

Pseudo-Denys l'Aréopagite* est une des grandes autorités théologique de la chrétienté avec Saint Augustin. Il est l'auteur du développement d'une théologie dite négative (apophatique* en grec) qui cherche à exprimer d'une manière adéquate la transcendance absolue de Dieu au moyen de la négation successive de tous ses attributs et désignations. Dieu est le Rien*.

P. Duhem commente ainsi la position de Pseudo-Denys :

Dieu est essentiellement inaccessible à toute raison, il échappe à toute connaissance, il défie toute détermination ; pour dire à quel point l'essence divine est insaisissable, les Kabbalistes rivalisent avec les néo-platoniciens et avec Denys. Pour soustraire l'Un* à toute détermination Proclus* le plaçait même au dessus de l'Etre, le faux Aréopagite lui faisait écho et Jean Scot Erigène, qui semble ne pas avoir été ignoré des auteurs du Zohar, répétait en les commentant les paroles de Denys ; mais par un désir analogue les rabbins désignent Dieu par un nom qui signifie nulle chose, qu'on peut traduire par Non-Etre ou Néant.*

Les blagues juives gardent vivante la tradition talmudique tout comme la tradition de la Kabbale*.

Au XIXème siècle les physiciens se livreront à propos de l'éther*, censé occuper le vide, à un exercice de dépouillement progressif et forcé, qui relève de la même logique de l'esprit humain que la théologie négative. Sorti des mains de Lorentz*, l'éther n'est plus qu'une référence (un repère) et c'est cette référence là qu'Einstein* élimine dans la Relativité Restreinte*. Las, la Mécanique Quantique* va prétendre qu'il reste encore quelque chose, le Vide Quantique*, qui ne peut servir de repère* tout en devenant une référence* dans le langage des états*.

Les alchimistes* donneront un statut particulier à la quintessence*. Au Moyen-âge c'étaient les mêmes hommes ou leurs disciples qui distillaient des remèdes, des couleurs, des vernis, et qui rédigeaient des célèbres traités de logique et de théologie scolastique*. Les grands noms de la philosophie se trouvent constamment associés à l'œuvre alchimique. Une bonne partie du corpus alchimique du Moyen-âge est attribué à Michel Scot, Albert le Grand, Thomas d'Aquin*, Arnaud de Villeneuve et Raymond Lulle. Dans le Timée Platon a développé une doctrine du cinquième élément, correspondant au dodécaèdre régulier. Dans le traité « Du Ciel », Aristote a transformé la théorie du cinquième élément en pierre

angulaire de sa cosmologie. Selon Aristote, la quintessence* ou l'éther* est la substance du monde supra lunaire, qui à la différence des quatre éléments du monde sublunaire n'est pas soumis à la génération et à la dégradation. C'est ce corps noble réservé au Ciel que les alchimistes vont essayer d'introduire sur la Terre. La Quintessence c'est la substance du Ciel utilisée comme médiateur universel entre les éléments. La Quintessence apparaît toutes les fois qu'on veut trouver un universel concret ou abstrait. Rabelais* écrira ses livres sous l'anagramme d'Alcofribas Nasier, abstracteur de quintessence.

Roger Bacon* franciscain anglais, une des grandes figures de la science au Moyen-âge, épouse la position d'Aristote au sujet du vide. Mais c'est un Aristote revu par Avicenne*, dont la hylé est une matière quasi vide. Aussi Bacon utilise l'existence du vide tout en niant qu'il existe. Les oscillations de Bacon au sujet du vide sont représentatives de l'histoire embrouillée de la conception de la matière dans le monde islamique et l'occident chrétien. Histoire embrouillée qui donnera mauvaise presse à la pensée scolastique*. Bacon ne distingue pas moins que cinq types de vide. Le troisième type existe au-delà du monde. Le cinquième type est identifié à la matière première

Un évènement majeur dans l'histoire de la philosophie médiévale est la condamnation d'Aristote par l'archevêque de Paris, Etienne Tempier en 1277. Du XIème siècle au milieu du XIIIème siècle, la doctrine d'Aristote, de retour d'Orient à travers les philosophies arabes (Avicenne*, Maimonide*, Averroes*, Al Ghazali) se pose en référence philosophique et scientifique. Les religions monothéistes aménagent une coexistence avec l'aristotélisme. Thomas d'Aquin est un des acteurs de ce mouvement. C'est en réaction à cela que l'Eglise tente de donner un coup d'arrêt à l'expansion des philosophies « orientales » et fait condamner 219 thèses inacceptables. Parmi celles-ci plusieurs propositions concernant directement ou indirectement l'occupation de l'espace et le vide. En rouvrant la question de la pluralité des mondes, historiquement et conceptuellement liée à l'atomisme et au vide, et la question de l'existence d'un vide extra cosmique, l'Eglise remet le vide en selle. La possibilité du vide et du mouvement dans le vide va se trouver au cœur des discussions de la physique du XIVème siècle. D'une certaine façon la possibilité du mouvement dans le vide, et la représentation du mouvement comme un état naturel du corps, est le fait majeur dont la reconnaissance et l'exploitation sont à l'origine de la Mécanique* moderne et de la science occidentale. Mais il faudra tout le XIV et le XVème siècles pour se débarrasser du modèle scolastique (aristotélien) du monde.

Galilée* pensait qu'il y avait deux vides : un dans l'espace auquel il ne croyait pas, un autre dans les interstices de la matière, auquel il croyait.

Descartes* ne pouvait croire au vide, car il considérait l'espace comme une substance. Comme le néant pour Bergson*, le vide n'est pour Descartes qu'une illusion relative à notre attente. Mais il faut alors préciser quelle est la substance qui emplit l'espace qu'on considère à tort comme vide, et c'est d'autant plus urgent que les physiciens du début du XVIIème siècle accumulent les preuves expérimentales de l'existence du vide. A Galilée*, à son élève Torricelli*, à Pascal*, Descartes répond en remplissant le vide d'une matière subtile. Stupéfiant ! Une matière subtile remplissant le vide et constituée d'une manière dualiste par une substance continue et une substance corpusculaire. Le dualisme* onde-corpuscule* de la physique quantique ne se trouvera pas dans une plus vaste galère que Descartes.

Pascal*, celui qui croyait au vide et en démontra expérimentalement l'existence.

Leibniz* commença par croire au vide, mais se faisant le champion de la continuité et de l'infini, emplit le vide de toutes sortes d'êtres bizarres : les monades. Leibniz critique l'atomisme de différents points de vue. Les atomes sont contraires à la raison.

Newton* croyait fondamentalement en la matière et au vide, mais ayant besoin dans ses théories, d'un milieu ou d'un médiateur actif, avait souvent recours à des éthers sur lesquels il formulait des hypothèses, tout en déclarant ne pas vouloir en faire. Ainsi la lumière est quelque chose susceptible d'exciter des vibrations dans l'éther. A partir de 1669 Newton montre un puissant intérêt pour l'alchimie* et sa pensée s'en ressent fortement.

Très judicieusement Newton pense que l'observation de frottements sur un pendule enfermé sous vide prouverait l'existence de l'éther. En fait une telle expérience faite par Newton lui-même en 1679 indique que la résistance due à l'éther est au moins 5000 fois plus faible que celle due à l'air. La physique quantique* donnera comme image de l'émission de lumière par un atome, le frottement d'un électron contre un hypothétique éther.

Newton considère son éther comme un mélange (tout comme Descartes) . une partie inerte le flegmatique body et une partie active. Deux siècles plus tard le grand chimiste Mendéleev aura une conception aussi étrange d'un éther mélangé.

Dans la partie de son œuvre antérieure à 1684, Newton utilise l'hypothèse d'éthers pour rendre compte de phénomènes très variés,

optiques, gravitationnels, électriques, caloriques et même physiologiques. Il suppose en particulier des variations de densité de l'éther au contact de la matière ou à l'intérieur de la matière. Grâce à de telles variations, il explique comment la lumière, corpuscules émis par les corps lumineux, se réfléchit, se réfracte ou se diffracte sur un obstacle (expériences de Grimaldi) en excitant des vibrations de l'éther.

Mais lorsqu'il recommence à travailler sur la mécanique et l'astronomie, et publie en 1687 son œuvre majeure « Les Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle », Newton abandonne toute idée d'éther pour expliquer les phénomènes de gravitation au profit d'une conception de forces agissant à distance dans le vide. L'éther ne réapparaîtra que dans la seconde édition des Principia en 1713 et dans la seconde édition de l'Optique en 1717. Ecrite en 1692, l'Optique paraît pour la première fois en 1704. Si la lumière reste toujours constituée de corpuscules, Newton pense avoir besoin d'un éther pour expliquer les phénomènes optiques par des mouvements vibratoires ou ondulatoires. Mais cet éther est infiniment subtil. En définitive, en corpusculariste convaincu, Newton croit en un éther creux, gaz infiniment dilué de particules microscopiques, incapable d'opposer une résistance aux corps macroscopiques. Un éther atomique qui laisse l'espace presque vide mais cependant actif.

Ces quelques aperçus sur les conceptions de Newton touchant au vide et à l'éther ne donnent qu'une faible idée du grand jeu entre l'action et les choses qui a occupé toute la vie du fondateur de la science moderne. Evoluant entre l'action à distance et l'action par contact, le vide et l'éther ; il a su opérer une transmutation de la pensée alchimique et des préoccupations théologiques pour créer la physique mathématique. Repli tactique dirons certains. Mais il a posé pour nous la problématique moderne du vide et de l'éther, à l'intérieur de laquelle nous tournons toujours en rond. Lui même considérant l'éther comme une hypothèse n'a en définitive pas pris parti. Après une longue période d'adhésion massive à l'éther (l'Encyclopédie*, Euler* et tout le XIXème siècle), le XXème siècle a retrouvé le scepticisme critique de Newton à ce sujet.

Kant* conteste le statut du vide, car le vide ne peut se manifester. Le vide est inconnaissable car il n'est pas un phénomène*. Le vide ne peut être qu'une chose en soi.(noumène*) qui nous est inconnaissable. Mais cette chose en soi devient tout de même chez Kant une chose tout court. Car entre la chose en soi et la matière première* d'Aristote, la distance est faible. Et Kant parce qu'il fonde tout son système de la nature sur les forces d'attraction et de répulsion, a

besoin d'un véritable support pour ces forces, sinon même d'une origine de ces forces. Il développe alors une théorie de l'éther, aboutissement de toute la physique kantienne.

Sans éther pas de perception de l'espace et du temps. Loin d'être une matière première indifférenciée, l'éther accède à la dignité de premier moteur*, source de tout mouvement. Kant va discuter longuement le statut de l'éther, qu'il dénomme indifféremment éther ou calorique. Le problème de l'existence de l'éther est essentiel pour « Le Passage des principes métaphysiques de la science de la nature à la physique », véritable thème de l'Opus Posthumum. En définitive, il semble bien que l'éther soit pour Kant un objet de la raison, permettant de comprendre l'expérience du dynamisme fondamental de la nature.

Kant n'est pas un physicien comme l'était Leibniz*. Mais la qualité de sa discussion du problème de l'éther nous introduit directement dans la problématique de la physique contemporaine. Le vide quantique* va se débattre entre noumène* et phénomène*, chose réelle abstraite ou objet phénoménal, un comme ça* ou un comme si.... Toute la physique quantique peut être historiquement à juste titre considérée comme une héritière de la tradition kantienne.

Fresnel* crée la théorie ondulatoire de la lumière et établit que les vibrations de l'éther doivent être perpendiculaires au rayon lumineux. Début du cauchemar du XIX^{ème} siècle. Comment imaginer un fluide où les ondes soient transversales et non pas longitudinales ? Fresnel s'y essaye à l'aide d'un modèle moléculaire...qui renverse toutes les idées reçues sur la constitution des fluides élastiques. Arago se désolidarise de Fresnel et le grand Laplace* se montre opposé à cette théorie. Quant à Young* il pense que l'éther doit être à la fois très élastique et solide !!!!!

Maxwell*, le père de la théorie du champ électromagnétique. L'éther est une substance matérielle infiniment plus fine que les corps visibles que l'on suppose exister dans les parties de l'espace qui semblent vides. L'éther est différent de la matière ordinaire. L'éther, si c'est le milieu des phénomènes électromagnétiques est probablement moléculaire. Quelles que soient les difficultés rencontrées dans les tentatives d'élaborer des représentations conséquentes de la structure de l'éther, il est indubitable que les espaces interplanétaires et interstellaires ne sont pas des espaces vides, mais sont occupés par une substance matérielle ou un corps très général, que nous devons envisager comme le plus homogène possible.

Thomson (Lord Kelvin) est découragé par l'échec des modèles d'éther qu'il propose.

Mendeleev*, un atomiste qui ne croit pas au vide. Le père de la célèbre classification périodique des éléments. Mendeleev. a conduit des recherches sur l'élasticité des gaz à très basse pression pour atteindre expérimentalement l'éther. Expériences rappelant celles de Newton sur le frottement subi par un pendule dans le vide. Il cherchait (et voyait) l'éther comme un état limite de la matière. Il plaçait son éther dans le groupe zéro de la classification périodique en l'appelant « newtonium ».

Poincaré* ne croit pas à l'éther, car en cette fin du XIXème siècle l'éther a perdu bien de ses atours, mais persiste à le considérer comme une hypothèse commode. C'est là le célèbre conventionnalisme* de Poincaré. Tout se passe comme si l'éther existait.

Michelson* dont les expériences ont donné des raisons de ne pas croire à l'éther, ne peut se résoudre à ne pas y croire. Pour lui tous les phénomènes physiques ne sont que les différentes manifestations de divers modes de mouvement d'un éther universel.

Lorentz* a destitué l'éther en le privant de toutes les propriétés de la matière ordinaire, mais continue à y croire comme doté d'une certaine substantialité.

Cassirer* croit à l'éther et au vide non pas comme objets physiques mais comme concepts théoriques. Il est l'auteur d'une conception systématique de la connaissance à travers des formes symboliques, subissant là l'influence du physicien Hertz*. Il faut renoncer à toute figuration immédiate intuitive de l'éther pour y voir un symbole conceptuel destiné à exprimer des relations physiques fondamentales. Le non être est un concept nécessaire et inévitable. Dans l'assujettissement du réel au concept le « néant sensible » revendique la même place et la même validité sans réserves que le « quelque chose ». Chez les grands physiciens de la fin du XIXème siècle une certaine conception réaliste de la physique tourne à une conception symbolique qui va s'étendre. Toute la physique quantique s'engouffre dans une atmosphère kantienne, au grand dam de certains. Le vide quantique* sera un éther conceptuel dont il va bien falloir avouer qu'il se dérobe à l'intuition directe.

Planck* a rendu compte de la loi du rayonnement du corps noir*. Pour cela il a imaginé la théorie des quantas*. Elle considère que les échanges d'énergie entre la matière et l'éther, ou bien entre la matière ordinaire et les petits résonateurs dont les vibrations engendrent la lumière, ne pourraient se faire que par sauts brusques, d'un quantum tout entier ou rien du tout. Ce faisant il abolit l'image d'un éther mécanique en la remplaçant par un éther mathématique de

vibrateurs formels. Image qui ouvre la voie au champ quantique et au vide quantique*. Planck a bien anéanti l'éther mécanique en ouvrant la voie à un éther conceptuel. Anéantissement ou retrait stratégique auxquels va participer la théorie de la relativité*. On ne peut décrire en termes mécaniques la chose éther mais on peut représenter les relations qu'elle entretient avec son environnement. Ce qui fait partie d'un univers mathématique conceptuel. Un grand tournant dans la pensée occidentale. Plutôt que se poser des questions sur la nature de l'éther mécaniste on s'est mis à examiner de manière critique les raisons d'admettre son existence.

Einstein* semble avoir empêché les autres de croire à l'éther, mais continue à y croire lui-même. Il n'y a pas d'éther pour servir de repère aux actions électromagnétiques. Mais cette négation de l'éther n'est pas nécessairement exigée par le principe de relativité. On peut admettre l'existence de l'éther, mais il faut alors renoncer à lui attribuer un état de mouvement déterminé. Nier l'éther signifie en dernier lieu qu'il faut supposer que l'espace vide ne possède aucune propriété physique. D'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens par conséquent un éther existe. Mais la notion de mouvement ne doit pas lui être appliquée. Entre Einstein et Planck se jouent les destins du vide et de l'éther au XXème siècle.

Bergson* philosophe irrationaliste*, écrit dans « L'évolution créatrice » que toute action vise à obtenir un objet dont on se sent privé....elle comble un vide et va du vide au plein, d'une absence à une présence, de l'irréel au réel....Nous nous servons du vide pour penser le plein.

Pauli*, un des pères fondateurs de la physique quantique ne croit pas à l'énergie de point zéro introduite pour le champ de rayonnement par Nernst, introduite par Planck lui-même pour ses oscillateurs dans sa seconde théorie du rayonnement du corps noir. Là où apparaît sans doute pour la première fois cette fameuse énergie de $\frac{1}{2} h\nu$.

Dirac*, applique la théorie quantique au champ électromagnétique et se trouve de ce fait le père du vide quantique*, plus bas état d'énergie du champ quantique. Il referme ainsi sur le vide quantique la chape de la mécanique quantique, qui met hors de portée le vide lui-même et l'éther. La mécanique quantique est une théorie des observations et non pas une théorie de l'objet que l'on observe. L'état de vide quantique comporte une fluctuation de certaines observables. Mais il ne s'agit pas de fluctuations d'un quelconque milieu. Le vide quantique est un état, non pas une

substance. Aussi Dirac ne croit pas à l'importance physique des « fluctuations du vide ». A la fin de la quatrième édition (1958) de son très célèbre traité de Mécanique Quantique*, il juge très sévèrement les nouveaux développements de l'Electrodynamique Quantique* dus en particulier à Feynmann*. Il considère qu'il n'y a là que des « règles de travail » que De Broglie qualifiera de « petites jongleries ».

L'électrodynamique quantique* a mis en place après Feynmann tout un petit théâtre où s'agitent des « particules virtuelles ». Une autre manière de chercher à rattraper la chose vide et qui sert à des raisonnements heuristiques pour expliquer les phénomènes importants dont on attribue l'existence au vide quantique, en particulier l'émission spontanée* ou l'effet Casimir. Ce qui amène le physicien Aitchison de s'écrier : le vide est un état et non pas une substance. Cette formule a le mérite de bien souligner la différence de statut qui existe entre le vide quantique et le vide classique, entre des raisonnements qui portent uniquement sur des états* et des considérations qui font jouer un rôle fondamental à des attributs* d'une substance. Ainsi les fameuses « fluctuations du vide », vide quantique dirons nous, sont les fluctuations des observables quantiques et non pas des fluctuations classiques d'un milieu matériel. La littérature de vulgarisation entretient une belle confusion à ce sujet, dans sa recherche pour donner aux phénomènes du vide quantique un aspect palpable.

Remarquons que Dirac est aussi l'auteur d'une célèbre équation, dont les solutions à énergie négative constituent le vide de Dirac* dont on peut extraire une paire particule-antiparticule* au moyen d'un photon*.

Mais le vide quantique n'a pas que des partisans et des théories concurrentes apparaissent.

Barut, un physicien dans la grande tradition de l'électromagnétisme classique, prône l'interaction de l'électron avec son propre champ, et considère qu'il n'y a pas lieu de quantifier séparément le champ électromagnétique. Un point de vue semi-classique. Il rejoint le scepticisme de Dirac et de De Broglie sur la théorie quantique des champs, et cherche avec succès à exprimer le plus de phénomènes possibles en terme d'auto interaction ou interaction avec le champ propre. Dans une telle conception il n'y a pas de vide quantique mais le vide reste le théâtre du champ.

Dans les années 70 différents auteurs ont pu montrer (dans le cadre de l'électrodynamique quantique* standard) que le phénomène d'émission spontanée* pouvait être interprété comme causé soit par les

fluctuations du vide* ou par la réaction de rayonnement* ou bien encore par une combinaison quelconque des deux effets.

L'image de la réaction de rayonnement a cependant de nombreux partisans. Citons Jaynes : « Cette complète interchangeabilité des effets de champ source et des effets de fluctuation du vide ne prouve pas que les fluctuations du vide sont réelles. Cela prouve seulement que les effets de champ source sont les mêmes que si des fluctuations du vide étaient présentes ».

Entre partisans du tout fluctuations du vide* et du tout réaction de rayonnement* ou action du champ propre s'installe une grande discussion scientifique montrant que les deux effets semblent coexister si l'on impose certaines conditions de vraisemblance physique.

Citons Von Baeyer chroniqueur scientifique dans « The Sciences ».

« Une théorie qui traiterait de l'atome sans mentionner le Vide et une description du Vide qui ne tiendrait pas compte de ses frontières seraient incomplètes...Cependant toutes les théories persistent à tracer une distinction nette entre les particules et les champs, et cette dichotomie se trouve à la racine paradoxale du Vide. Les propriétés étranges du Vide-densité d'énergie infinie, fluctuations, déplacement de Lamb,effet Casimir, inhibition de l'émission spontanée- dérivent en définitive de la séparation artificielle des particules chargées des champs électriques et magnétiques qui les entourent. Il y a déjà longtemps qu'Albert Einstein avait compris ce défaut de la mécanique quantique. Dans les années 40, lors d'un séminaire il déclarait : je sens que c'est une illusion que de considérer l'électron et le champ comme deux entités physiques différentes. Puisque aucun des deux ne peut exister sans l'autre, on ne doit décrire qu'une seule réalité, qui se trouve avoir deux aspects différents : la théorie devrait reconnaître cela dès le départ »*

Milonni, un des maîtres de l'optique quantique*, est l'auteur du premier ouvrage de synthèse sur le vide quantique : « The Quantum Vacuum. An introduction to quantum electrodynamics. Academic Press. 1994 ». Il reprend la discussion de Barut sur la réalité des fluctuations quantiques du vide, tout en concluant que fluctuations du vide et réaction de rayonnement interviennent simultanément en théorie quantique tout comme dissipation* et fluctuation* en théorie classique.

Milonni, après une analyse des points de vue opposés s'exclame : « Il semble que la généralisation de ces idées peut nous conduire à considérer le champ du vide plutôt comme un artifice formel ou un subterfuge plutôt qu'une chose physique réelle ».

Et Baez un grand physicien théoricien d'argumenter qu'il existe des formulations de la théorie quantique des champs dans un langage abstrait dit des C^* algèbres. Il existe différentes représentations de la C^* algèbre des observables en tant qu'opérateurs sur l'espace de Hilbert*. Il y correspond différents état vide, ce qui montre bien leur caractère de construction mathématique.

Mais le concept de vide quantique* envahit toute la physique.

Matthews correspondant scientifique au Sunday Telegraph écrit :

« Chaque fois que vous allumez la lumière, vous assistez à un phénomène dont les physiciens pensent qu'il pourrait être la clef du Big Bang. Solution du cauchemar du cosmologiste, explication de la gravitation et remède à la crise mondiale de l'énergie ??? Le danger est de voir le Vide de venir la réponse de tout un chacun pour tout .Les philosophes avaient raison, la nature a horreur du vide. Il se peut bien que les savants du prochain siècle en soient amoureux. »*

Le vide est présent dans toute la physique contemporaine de la microphysique à la cosmologie. Des mesures expérimentales détaillées de la force de Casimir effectuées récemment, permettent de tester avec précision cette prédiction fondamentale de la théorie quantique des champs et d'explorer la gravité newtonienne à courte distance.

Gunzig, physicien cosmologiste, introduit un vide quantique dans un scénario de cosmogénèse semi-classique* où un champ universel de substance dans l'état vide interagit avec la courbure de l'espace temps* dont l'expansion* fournit l'énergie primordiale nécessaire à la formation de trous noir*. Un vide agissant sur un autre pour former l'univers.

Depuis vingt cinq siècles le vide n'a rien perdu de son mystère

LE VIDE ET LE FOND

Je ne manipule pas l'espace, je
ne joue pas avec lui,
Je le déclare
Barnett Newman

Le vide comme métaphore* dans la dialectique de la figure* et du fond*.

Le physicien contemporain, spécialiste de mécanique quantique, jette un regard étonné et gourmand sur les pratiques de la représentation artistique, qui lui révèlent les caractères de sa propre pratique. Il découvre que toutes les expressions artistiques ont recours à la construction de fonds et que la problématique figure-fond mise à l'honneur par la psychologie gestaltiste est récurrente dans bien des domaines. Avec chez de très nombreux artistes ou critiques le sentiment profond que le vide et le fond sont un même combat pour l'expressivité.

Le physicien sait bien qu'il partage avec l'artiste la recherche de la représentation avec le dilemme commun du réalisme et de la mimésis. Qu'est ce que la théorie physique saisit du réel ? Il perçoit bien que le vide quantique est une construction mathématique. Il découvre en y réfléchissant qu'il n'y a pas de fonds dans la nature. Il n'y a que des arrière- plans sauf les jours de grand brouillard ou dans les situations de brouillage informationnel.

Le fait que le fond soit une construction mentale a été révélé par la considération systématique des instabilités fond-figure chez les gestaltistes. Le fond comme le vide est introduit par le créateur pour satisfaire aux exigences cognitives du cerveau humain. Introduire ou reconnaître un fond signifie avant tout que l'on est en position de représentation et non pas en situation de mimésis. Le fond comme le vide affirment l'aspect fonctionnel de l'œuvre au dépens de l'aspect ressemblance. Et ceci dans tous les domaines où la notion de fond est pertinente, en peinture, en musique, en littérature même.

Le physicien reconnaît là une doctrine plus générale de la physique, où à strictement parler l'espace n'existe pas en lui même mais s'avère comme un moyen perceptif ou mathématique pour traduire l'existence des objets et leurs interactions. C'est là une des grandes leçons de la relativité générale qui montre la non indépendance de la matière et de l'espace, la non autonomie de l'espace. La matière dit à l'espace comment se courber. En l'absence de matière l'espace est plat, vide disons nous. C'est la situation normale. La présence de matière est pathologique. « La matière est une maladie de l'espace » dit joliment René Thom.

Schopenhauer a très bien perçu le caractère conventionnel de l'espace (vide) comme intermédiaire imperceptible mais nécessaire à la représentation des choses :

« La preuve la plus convaincante et aussi la plus simple de l'idéalité de l'espace est que nous ne pouvons pas faire abstraction de l'espace, contrairement à tout le reste. Nous ne pouvons que le vider. Tout, tout, nous pouvons tout éliminer de l'espace par la pensée, le faire disparaître, nous pouvons également très bien concevoir que l'espace entre les étoiles fixes soit absolument vide, et ainsi de suite. Il n'y a que l'espace même dont nous ne puissions d'aucune manière nous débarrasser. Quoique nous fassions, où que nous nous positions, il s'y trouve et n'a de fin nulle part, car il est à la base de toutes nos représentations, il en est la condition première »

Parerga und Paralipomena

II è partie. Leipzig. 5 vol. t.5, p57

Ce texte est cité et traduit par Pierre Schneider dans la monumentale étude qu'il consacre au fond en peinture : « Petite histoire de l'infini en peinture ».

Notre physicien lit cet ouvrage avec un intérêt passionné, notant au passage toutes les similitudes entre le vide et le fond. Les clins d'œil sont incessants et il s'amuse à voir l'auteur se débattre avec succès dans tous les pièges de la langue, et toutes les difficultés qu'il y a à jongler avec les termes vide et rien.

Il reconnaît d'emblée que le fond est une création artificielle qui rend l'image visible :

« J'appelle fond ce qu'il y a quand il n'y a plus rien derrière. Rien, c'est à dire le vide, et si l'on pousse plus avant, le support – mur, toile, feuille de papier, plaque de métal ou de pierre. Le support sert de fond, il n'est pas le fond.....

Le fond c'est nous qui l'apportons, c'est l'image qui le greffe sur la pierre ou sur la toile aveugle, qu'elle transforme ainsi en support faute de quoi elle demeure invisible » (p.14).

Le fond c'est le rien de l'image, et c'est ce rien là qui rend l'image visible. Mais cette image est loin d'être illusionniste, elle s'affirme image.

« L'image ne se confond plus, ne saurait plus être confondue avec son support matériel. Entre elle et lui s'insère comme en peinture, ce vide que l'homme transporte avec lui où qu'il aille et que j'appelle fond » (p.22).

Le fond pour ne pas confondre. Le vide pour distinguer les phénomènes et les particules. Le vide et le fond pour bien marquer la distinction entre l'œuvre et le modèle.

« Il (le peintre) sait que sa tâche, qu'il le veuille ou non, sera d'abord de montrer ce qui l'en (du modèle) sépare – le vide, le fond, l'Abgrund..... » (p. 23).

«s'interjecte entre les figures et le support, ce vide énigmatique que j'ai nommé fond. » (p. 20).

Dans un carnet utilisé en 1858 et 1859, Degas note : « Il faut que je pense aux figures avant tout, ou au moins que je les étudie en pensant seulement aux fonds ».

« Tout ce qui entre dans la composition des images relève soit des figures soit du fond. L'arrière plan est une figure qui se veut aussi grande que le fond afin de se substituer à lui et l'empêcher ainsi d'envahir le champ pictural...

Le fond perdu (Abgrund), modalité du fond (Grund) s'en distingue par sa profondeur illimitée...

Ces fluctuations du rapport des figures et du fond composent une histoire de la conscience (et, en creux, de l'inconscient). » (p.16).

L'arrière plan est un faux fond. Faux vide et vrai vide. Instabilité du vide. Echange entre figures et fonds dans les illusions gestaltistes.

**Tout vient du fond et y
retourne**

Joan Miro

Le fond comme vide créateur en peinture.

Le fond joue dans la peinture d'icônes un rôle considérable. Il est l'objet de tous les soins du peintre depuis la préparation de la tablette de bois avec ses enduits divers, jusqu'aux dorures et aux différentes applications métalliques, y compris éventuellement la couverture presque totale de l'icône par une châsse en argent ciselé.

Entre le fond et le vide la peinture d'icônes établit une correspondance métaphysique éblouissante. D'autant plus évidente que la théologie orthodoxe a partie liée avec l'apophatisme, qui prend racine chez Plotin et Pseudo Denys l'Aréopagite. Une théologie négative qui s'épanouit chez Maxime le Confesseur, Jean de Damas, le défenseur des icônes, et Grégoire Palamas, l'initiateur de l'hésychasme. Une théologie négative qui donne aux fonds dans l'icône des privilèges incomparables que Malevitch traduira à sa façon par ses tableaux manifestes du Carré Noir et du Carré Rouge. Avec cette attitude extrême de certains iconographes qui voudraient exprimer « le vide de l'icône » en prétendant avoir réalisé une icône dans un support en bois recouvert d'une feuille d'or.

Car le fond d'or dans l'icône est un vide rayonnant fondamental. Les traités d'iconographie le dénomment lumière. Il est à la fois mur et lumière, pour marquer la limite de l'inaccessible et la médiation lumineuse entre la divinité et le monde. Un éther lumineux impalpable et présent. Tout comme l'iconostase dans l'église orthodoxe.

Le prince Troubetskoi, fameux pour ses études de l'iconographie, écrit justement dans « Deux mondes dans l'iconographie russe » (1916) :

« Et voici sans doute le fil conducteur : la mystique de l'iconographie est avant tout une mystique du soleil au sens spirituel le plus haut....Si belles que puissent être les autres couleurs du ciel, c'est l'or du soleil à son zénith qui symbolise « la lumière des lumières » « le miracle des miracles »...

Seul, Dieu qui resplendit comme le soleil est la source de la lumière royale ; les autres couleurs qui l'entourent expriment la vraie nature de la création, le ciel et la terre glorifiés qui constituent le temple vivant du Seigneur, le temple « non créé de main d'homme ».

Dans ce même texte, Evgeni Troubetskoi tente d'expliquer la représentation courante de la Sophia – Sagesse de Dieu-, sur un fond très sombre, voire noir :

« Nous voyons dans ces icônes Sophia assise sur un trône, sur le fond bleu foncé d'un ciel nocturne étoilé.....Toute la Sagesse a créé le monde, chante-t-on dans les cantiques d'église. Cela signifie que la Sagesse, c'est précisément ce dessein créateur de Dieu, par lequel toute la création céleste comme terrestre vient à l'être à partir du non-être, à partir des ténèbres nocturnes.....

La représentation de Sophia dans l'icône novgorodienne se présente comme un commentaire iconographique du début de l'Évangile selon Saint Jean. Les mots « Au début était le Verbe » par un évangile sur l'autel. L'image du Christ directement sous l'évangile renvoie à « Et le Verbe était Dieu ». Dans l'icône Sophia est mise en relation directement avec le Verbe « par lequel tout est advenu ». Quant à l'obscurité nocturne elle fait allusion au verbe et à la lumière qui brille dans l'obscurité, sans que celle-ci s'en saisisse. »

La lumière de Dieu et le monde jaillissent des ténèbres comme la lumière et les particules jaillissent du vide.

Remarquons d'ailleurs que les fonds noirs sont fréquents dans l'icône ajoutant à leur signification et à leur mystère un effet dramatique certain. Quant aux fonds rouges

dans les icônes de Saint Georges terrassant le dragon ou du prophète Elie sur son char, ils sont trop connus pour qu'il soit besoin de les rappeler ici.

Revenons au fond noir en peinture comme représentation du vide d'où surgit la création, les figures en particulier. Effet dramatique et puissance symbolique s'allient pour tenter de nombreux peintres, notamment à la Renaissance. Qu'à l'époque de la mimésis perspectiviste de nombreux peintres aient eu recours aux fonds noirs (espaces vides) est révélateur de la puissance expressive du fond. Les portraits, essentiellement de profil, surgissent du fond noir qui les porte et les crée.

Le fond noir crée un effet d'apparition que recherche effectivement toute stratégie de renforcement de l'expressivité des figures par la mise en place d'un vide. On rêve d'une exposition qui réunirait ces amoureux du fond noir². Piero della Francesca et le portrait de Sigismondo Pandolfo Malatesta au Louvre. Lorenzo Lotto et son portrait de femme du Musée de Dijon, ou la Madone à l'enfant avec saint Flavien et Saint Onophrius de la Galerie Borghèse à Rome, ou bien encore le Mari et sa femme du Musée de l'Ermitage. Que dire d'Antonello da Massina et de son Condottiere du Louvre ! Et de Domenico Ghirlandaio et de son portrait de Giovanna Tornabuoni de la collection Thyssen à Madrid. Sans parler de Raphaël..... et de Dürer.

Eloge du noir. Eloge du vide.

Le concept de fond déborde largement le domaine de la peinture . C'est au même titre que le vide est un concept très général. Le fond comme le vide opèrent dans la description du monde un découpage simplificateur. Ils participent de la stratégie cognitive de reconnaissance d'objets. Ils sont tous les deux relatifs et dépendent du type d'attention que nous portons aux événements.

Différents auteurs ont tenté d'examiner le rapport fond-figure dans d'autres domaines que celui de la peinture, et d'étendre la théorie de la gestalt à la musique ou à la poésie, voire à la littérature. Ainsi un théoricien de la poésie comme Reuven Tsur a essayé de montrer que les aspects esthétiques parmi les plus intéressants concernant le rythme poétique, les figures de la rime et la forme des stances, ne pouvaient être compris qu'en ayant recours à la théorie de la gestalt. Dans un article récent il s'intéresse plus particulièrement à la relation figure-fond : « Metaphore and figure-ground relationship. Comparisons from poetry, music and the visual arts ». Cette relation figure-fond ne lui paraît pas générale en littérature ou en musique. Il

cherche à la concrétiser en examinant différentes interprétations de la Sonate au clair de lune de Beethoven. Mais il met surtout en relief la manipulation de l'arrière plan en musique et non pas tant celle du fond. L'arrière plan n'est pas le fond, ni en musique, ni en peinture, ni en littérature.

Par contre il discute les propositions d'un autre linguiste, Margaret Freeman, qui a étudié la manière dont on perçoit le temps à travers ses différentes métaphores, en s'appuyant sur la poésie d'Emily Dickinson. Le temps peut être perçu comme une figure par rapport à un fond, ainsi lorsque l'on parle du temps comme d'un remède. « Le temps guérit tous les maux ». Mais lorsque l'on dit que « L'amour subit l'épreuve du temps », le temps est le fond sur lequel s'éprouve l'amour. En fait le physicien voit bien là comme pour le vide, la distinction entre le temps évènementiel, irréversible et riche en information, et la durée-le temps cinématique, vide d'information. La distinction entre ce qui constitue un phénomène, un évènement, et ce qui se coule dans la banalité et la normalité.

Donnons encore un exemple pour illustrer la manière dont notre conscience perçoit le monde en y distinguant le normal et la pathologique.

Le peintre russe Wroubel, maître de la peinture fantastique à la fin du XIX ème siècle, écrit à un ami à propos de son oeuvre « L'huître perlière » :

« Si tu imagine de peindre quelque chose de fantastique-tableau ou portrait- commence toujours par un morceau quelconque que tu peindras d'une manière tout à fait réaliste. Dans un portrait, cela peut être un anneau sur un doigt, un mégot, un bouton, un détail quelconque peu remarquable, qu'il faut cependant réaliser avec toutes les minuties, directement d'après nature. C'est comme le diapason pour le chant choral - sans un tel morceau, toute ta fantaisie sera chose fade et pensive – mais pas du tout fantastique. »

Le réalisme comme un diapason pictural permettant de faire ressortir le fantastique. Le réalisme, c'est la normalité. Le fantastique, c'est l'anormal.

Tout comme l'étude de l'imaginaire, l'étude du fantastique définit un champ très riche pour la sémiotique. Une apparente logique conduit la plupart des théoriciens à définir le fantastique par opposition à la notion de réalité. Roger Caillois parlait « d'une irruption insolite presque insupportable dans le monde du réel ». Et

Gérard Prévot écrivait dans son journal : « Le fantastique naît du vide », alors que le philosophe Clément Rosset déclare : « le vertige fantastique n'est pas la sensation d'un manque mais la découverte que le réel est lui même le rien ».

La banalité du réel le désigne comme le fond (vide) du fantastique.

VIDE QUANTIQUE

Une des grandes leçons de la Mécanique Quantique* est que l'on ne peut surprendre un système microphysique dans une situation où toutes les interrogations possibles du physicien recevraient des réponses certaines, où à chaque question il n'y aurait qu'une seule réponse toujours identique à elle-même. Il n'est donc pas pensable qu'un système microphysique affiche zéro avec certitude et obstination pour toutes les observations.

Le Rien n'existe pas en Mécanique Quantique. Il n'y a pas de repos absolu ou de vide absolu.

Ainsi à la place d'un oscillateur harmonique, qui en mécanique classique peut totalement s'immobiliser (le repos du pendule), la M.Q. introduit un oscillateur harmonique quantique, avec un état de plus basse énergie non nulle manifestant un certain "résidu d'activité". L'état de "repos" contient encore de l'énergie. On parle alors des "vibrations de point zéro". L'effet de ces vibrations est expérimentalement observé dans le comportement des solides au voisinage du zéro absolu de température. Au zéro absolu ($T = -273^{\circ} \text{C}$) il y a encore un "mouvement fluctuant résiduel".

C'est par le biais de la représentation des champs en théorie quantique, comme assemblées d'oscillateurs harmoniques quantiques, que s'introduit la notion de vide quantique aux propriétés fluctuantes.

La Mécanique Quantique et les théories quantiques nomment " Vide Quantique" tout état d'un système microphysique où l'observable du nombre de corpuscules (particules ou quanta) prend des valeurs toujours nulles et où l'observable correspondant aux propriétés complémentaires (les caractéristiques du champ par exemple) prend des valeurs dont seule la moyenne est nulle.

Dans un "état de vide quantique" on ne peut détecter de corpuscules, mais l'observable du champ prend des valeurs qui fluctuent autour d'une valeur moyenne nulle. C'est un état de vide de corpuscules mais il y'a toujours un champ présent.

Le Vide Quantique est un état* et non pas une substance*. Mais ce n'est pas un état de Rien*. C'est l'état de référence à énergie minimale pour le calcul des excitations*.

Dans le cas du champ électromagnétique, l'observation des fluctuations du champ dans un état de vide quantique (absence de quanta), "les fluctuations du Vide*", est impossible expérimentalement en pratique. Si cette observation était possible, on se mettrait en contradiction avec la Relativité Restreinte en exhibant là un repère privilégié. Les fluctuations du vide ont les mêmes caractéristiques phénoménologiques que celles du champ résiduel* en électromagnétisme classique, mais elles n'ont pas le même statut. Cependant un certain nombre d'effets expérimentaux peuvent être interprétés et calculés au moyen des fluctuations du vide*: l'émission spontanée*, l'inhibition de l'émission spontanée dans une cavité*, l'effet Casimir* et ses multiples manifestations, l'effet Lamb*. Mais en l'absence d'observation expérimentale directe et en présence d'autres explications pour ces mêmes effets, on peut douter de la réalité physique des fluctuations du Vide. Elles ne seraient en définitive que des "Comme si". Si non e vero, e ben trovato. On n'est pas prêt de remplir le Vide "Comme ça" avec du Vide Quantique.

Le rôle du vide quantique est tout d'abord de représenter l'interaction de l'électron avec son propre champ (réaction de rayonnement*) au moyen de particules virtuelles*ou des fluctuations du vide*. Tout se passe comme si* l'électron manifestait là sa sensibilité aux fluctuations du vide.

En théorie quantique des champs* les fluctuations s'interprètent comme naissance et annihilation de particules virtuelles* ou de quanta* virtuels du champ.

Chaque théorie de champ quantique introduit son propre "Vide Quantique" et leur réunion constitue un vide quantique général. On peut se demander s'il existe un Vide Quantique unique résultant de l'Unification* éventuelle de toutes les théories de champ.

Certaines théories quantiques des champs permettent l'existence de différents états de vide quantique. Ceci devient dramatique dans une théorie quantique de champ sur un espace-temps courbe, où il devient difficile à des observateurs de tomber d'accord sur ce qu'ils considèrent comme le vide.

Tout ceci souligne le caractère de construction contextuelle du vide quantique.

La M.Q. donne en fait au Vide le même statut qu'Aristote donne à la matière, un statut de support sans forme, un état de référence en puissance d'objets.

La M.Q. ne répond pas à la question : « qu'est ce que le vide ? » pas plus qu'elle ne livre vraiment le secret de la stabilité de l'atome d'hydrogène. Elle constate l'existence d'états fondamentaux, possédant certaines propriétés, mais ne sait pas expliquer comment ces états fondamentaux sont 'constitués' à partir des 'pièces détachées'

VIE

Une définition de la vie n'existe pas, mais l'on sait énumérer des caractéristiques des phénomènes vivants ou des systèmes biologiques*. La réunion de ces caractéristiques ne suffit pas à soi seul à définir la vie, car elle n'assure pas le succès d'un quelconque réductionnisme* et n'exclut pas une attitude globale que l'on pourrait qualifier de vitaliste*. On ne dispose pas d'une théorie générale des systèmes vivants et la théorie générale des systèmes complexes* offre pour l'instant peu de ressources en ce domaine.

La vie résulte de trois grandes fonctions : la fonction de nutrition, la fonction de reproduction* (reproduction pour l'organisme* et l'espèce*, reproduction pour la cellule* et le développement*) et la fonction de relation (avec le milieu, entre les cellules ou entre les individus dans l'espèce. La vie engendre des formes* (Cf. Morphogénèse biologique*). La vie correspond à une grande unité des phénomènes physico chimiques dont elle est le siège. Elle met en jeu de nombreuses causalités avec des boucles de rétroaction* complexes. Elle est le siège de compartimentements bien définis et d'une organisation complexe (Cf. Auto-organisation*) ainsi que d'oscillations (auto-oscillations*) réglant les mouvements de l'organisme.

Les grands progrès de la biochimie*, de la biologie moléculaire* et de la biophysique* permettent cependant d'avancer une définition constituée comme un inventaire en disant que les systèmes vivants sont des systèmes ouverts* maintenus dans des états stationnaires, loin de l'équilibre, par des flux de matière et d'énergie où des cycles autocatalytiques* génétiquement programmés extraient de l'énergie et construisent des structures internes complexes, ce qui permet une croissance de l'organisation* à l'intérieur de l'organisme* au dépens de l'entropie de l'environnement avec mise en place d'une stabilité structurelle*. On pourrait aussi mobiliser l'auto-organisation*,

l'autopoïèse* et l'émergence* ainsi que la morphogénèse biologique*. Voilà bien une liste de mots clés sans véritable concept unificateur.

A vrai dire on ne trouve dans les systèmes biologiques aucune propriété qui ne soit présente dans divers autres objets de la nature. De plus on a du mal à distinguer le vivant du non vivant. Un virus* et un bactériophage* sont ils vivants ? Ne sont ils que des machines moléculaires* ? La vie n'est elle pas plutôt un ensemble de machines moléculaires ? Une véritable usine.

Il faut dire que l'activité de la physique après la deuxième guerre mondiale a mis aux mains des biologistes de nombreux outils conceptuels permettant d'essayer de modéliser les phénomènes vivants. La cybernétique*, la théorie de l'information* et du codage*, la théorie générales des systèmes*, la thermodynamique de non équilibre*, la théorie des systèmes dynamiques*, l'étude des systèmes complexes* ont largement enrichi le discours de la biologie sans pour autant donner naissance à une biologie théorique*. Le développement de l'informatique a engendré de très nombreuses simulations* des phénomènes vivants dans des domaines aussi variés que les automates cellulaires*, la vie artificielle* ou l'intelligence artificielle*. La biotechnologie* a de son coté contribué a stimuler la production de modèles mathématiques des phénomènes biologiques. Enfin la nanotechnologie* permet d'espérer de nouvelles données expérimentales au niveau moléculaire.

La grande difficulté de la compréhension de la vie provient de la difficulté à limiter la définition du système vivant à l'organisme isolé. En fait l'environnement biologique et culturel joue un rôle fondamental, ainsi que les interactions synchroniques et diachroniques avec les organismes de même espèce au travers de l'évolution*. Il n'y a pas d'organisme vivant unique. Tout organisme vivant se trouve au milieu d'un ensemble d'organisme identiques, et cet ensemble présente des propriétés qui résultent de l'évolution* biologique. Comme si le fonctionnement d'une machine dépendait des autres machines et des machines qui l'ont précédée.

On doit souligner la grande unité des êtres vivants, qui ne sont vivants qu'à l'intérieur de la biosphère*. Hors de la biosphère un virus ou un bactériophage ne sont que des machines moléculaires. Cette unité s'exprime ainsi :

- 2. Le vivant est toujours constitué de carbone et d'eau. L'eau* joue un rôle déterminant dans la vie.**
- 3. Dans la construction des molécules fondamentales sont utilisées des molécules de même symétrie spatiale (homochiralité*) : L (acides aminés*) D (sucre*).**

4. **Tout le vivant sur notre planète a un codage génétique* identique.**
5. **Dans le phénomène de la continuation de la vie par hérédité il y a un mécanisme unique de réplication des macromolécules.**
6. **Un même système métabolique fait que les produits de certains organismes servent de substrat à d'autres.**

Aujourd'hui, la question scientifique et philosophique sur la nature de la vie bénéficie d'un regain d'intérêt. Le développement des études sur les origines de la vie sur Terre et la recherche de traces de vie sur d'autres planètes, les ambitions de parvenir un jour à créer une vie artificielle*, et surtout l'appréhension des organismes vivants en tant que systèmes globaux ont en effet changé la donne.

La synthèse de composants et leur remplacement impliquent toujours l'action d'une autre série de macromolécules interdépendantes, lesquelles dépendront à leur tour d'une autre série, et ainsi de suite. Tout dépend donc de tout, ce qui constitue un fascinant mystère. Cette circularité, ou récursivité*, marquait pour le théoricien de la biologie Robert Rosen, la différence essentielle entre une machine et un organisme : dans ce dernier, chaque élément étant causé par un autre élément, le système est causalement clos

De ce qui précède, il ressort que la vie n'est pas une substance, mais un processus autonome et complexe. Un processus où la structure de chaque organisme est causalement liée aux nombreuses structures qui l'ont précédée. Aussi devons-nous chercher la spécificité de la matière vivante dans son historicité, dimension présente dans l'étude de la vie depuis Charles Darwin. Les êtres vivants sont ce qu'ils sont pour des raisons historiques. La comparaison entre tous les êtres vivants, grands ou petits, aérobies ou anaérobies, terrestres ou aquatiques, montre que les similarités biochimiques sont plus frappantes que les dissemblances, ce qui témoigne de legs au fil du temps. La dynamique et les contingences de l'évolution façonnent la biodiversité* tout au long des temps géologiques. Pour résumer, nous dirons que la vie terrestre prend la forme d'un réseau planétaire d'entités reliées dans l'espace par leurs activités métaboliques, et dans le temps par leur descendance. La matière vivante est donc radicalement différente de la matière inerte, ce qui fait de la biologie* une science essentiellement différente d'autres sciences telles que la physique .

VIE ARTIFICIELLE (Cf. Biologie synthétique*)

Procédure numérique de création de formes* semblables à des formes vivantes. Version numérique de la démarche de Stéphane Leduc dans sa « *Biologie Synthétique* ». Les jardins chimiques de Leduc produits sur écran d'ordinateur par des algorithmes numériques comme les automates cellulaires*. La vie artificielle s'intéresse aux processus de la vie* et non pas à ses constituants matériels. Par delà le projet esthétique il y'a là un intérêt pour les combinaisons de processus qui rejoint les représentations utilisées par la biologie post-génomique* dans l'étude des interactions fonctionnelles complexes. En synthétisant des systèmes simples très similaires à des systèmes vivants la vie artificielle explore de manière constructive les limites possibles de la vie. Activité de modélisation* et de simulation* de systèmes complexes analogues à ceux du métabolisme et du développement.

VIRTUEL

Du latin *virtus* - force, puissance.

Caractéristique modale* dont les emplois fort différents trahissent les diverses démarches psychologiques et cognitives d'appropriation du réel, ainsi que les tensions liées au désir constant de réification*.

C'est souvent la marque d'un "Comme si" qui cherche à se faire passer pour un "Comme ça". Témoin l'usage contemporain du terme "Réalité virtuelle*", pour désigner les images de synthèse et leur manipulation. On tente d'accréditer l'idée d'un substitut du réel.

D'une manière générale virtuel est opposé à actuel*, désigne le non-actuel, et semble souvent utilisé dans le même sens que possible* en puissance*. Mais on peut distinguer un sens faible, marquant seulement une possibilité, et un sens fort suggérant une actualisation imminente. La langue courante considère ce dernier cas en insistant sur la proximité du virtuel et de l'actuel. Elle parle par exemple d'un résultat électoral virtuellement acquis.

La physique utilise le terme de virtuel en un sens fort opposé, où virtuel signifie fictif. Elle accorde pourtant une quasi réalité ou une réalité éphémère aux particules virtuelles*.

VIRUS

VISION (Voir c'est savoir)

C'est le statut de la vision dans la culture d'une époque, qui détermine le rapport du voir au savoir*. Un statut qui influence profondément le caractère de la démarche scientifique au même titre que celui de l'expression artistique. Un parallélisme qui suffit à lui seul à révéler les liens profonds qui existent à chaque époque entre le caractère de la science et le caractère de l'art. Soulignant par là que l'art se veut bien souvent par le biais de l'émotion une source de connaissance là où la science se veut une représentation* objective de la Nature et de l'Homme. Démontrant amplement la liaison profonde entre la perception et le langage que s'emploient à révéler dans le détails les sciences cognitives d'aujourd'hui, qui insistent à juste titre sur l'importance des métaphores* visuelles à côté des métaphores corporelles dans les formulations de la connaissance*. Et cependant l'histoire fait mentir les rapprochements hâtifs d'étymologies distinctes en montrant que savoir ce n'est pas toujours voir, ou que voir ne suffit pas à savoir. Sans évoquer ici l'interversion constante de savoir et de pouvoir entre le français et le « belge ». Il n'en reste pas moins que de nombreux moments forts de la science sont intimement liés à l'extension de notre vision grâce à des dispositifs technologiques. Tel le télescope et le microscope, la photographie et le cinéma, ainsi que de nos jours l'imagerie médicale et l'imagerie du nanomonde. Voir le cerveau en action (RMN fonctionnelle) ou voir les atomes (microscope à effet tunnel), sans parler bien sûr de l'exploration visuelle de la Lune ou de Mars par retransmission à distance d'images photographiques, sont des exploits qui alimentent l'imaginaire tout court avant même de nourrir l'imaginaire scientifique.

A la Renaissance, les problèmes de la perspective tout comme ceux de la cartographie sont des problèmes techniques de représentation du monde avant de devenir des problèmes esthétiques. Piero della Francesca ou les cartographes de Florence sont des artistes « mathématiciens ». D'une manière générale la perspective a stimulé l'utilisation et la mise au point d'instruments en astronomie, en optique et en « dessin technique »^{3[2]}. En fait la perspective est un élément essentiel de la vision mécanique du monde, avec son utilisation de l'observation, de l'expérience et de la mesure. Les instruments doivent aider l'œil (Luca Pacioli). C'est déjà peut-être en germe l'idée de la vision artificielle.

Alors que biologiquement vision et langage se présentent comme largement entremêlés, ils s'opposent souvent dans la culture d'une époque. On voit tantôt privilégier le langage, le discours, le

raisonnement comme sources de certitude sur le monde et garanties de la vérité. C'est le règne de la démonstration et de la rhétorique, de l'argumentation et de la logique. Tantôt on voit dominer le pouvoir des images et des représentations visuelles. De tout temps rationalité et imagination visuelle sont opposés, et ce conflit sous-tend bien des polémiques religieuses, scientifiques ou artistiques. Témoins la crise iconoclaste dans le monde byzantin ou la querelle des poussinistes et des rubénistes au XVII^e siècle.

On ne peut pas alors ne pas être frappé par le curieux cours historique de la science de la logique dans la pensée occidentale. Les historiens de la logique font en effet remarquer que la logique n'a connu en Occident (monde islamique inclus) que trois périodes fastes, chacune relativement courte¹. La période de l'antiquité grecque, entre 350 et 200 avant J.C., celle où Aristote fonde la logique comme règle de l'argumentation. La période médiévale –la plus longue- de 1100 à 1450, avec en particulier l'œuvre de Guillaume d'Ockham. La période moderne depuis le milieu du XIX^e siècle, période de la logique mathématique. Boole, Peano, Frege, Russell en sont les héros. Dans les intervalles de plusieurs siècles, rien ou presque rien, si ce n'est de citer Boèce (480-524) et Leibniz (1646-1716).

Ce n'est sans doute pas une coïncidence si dans le trou de la logique entre 1450 et 1850 s'installent l'art de la Renaissance avec ses héritiers et la science expérimentale, fondement de la science moderne. Art et Science ont alors les mêmes intérêts et les mêmes objectifs. Rendre compte du monde visible. Justifier le développement d'une société dominée par la production « industrielle » et où la marchandise devient une valeur centrale. Une société où avoir raison consiste à posséder et manipuler des objets fabriqués ou des objets de la nature. Une société où savoir c'est pouvoir et où pouvoir nécessite de voir.

Dans son très beau livre^{4[4]}, Amos Funkenstein, consacre un chapitre entier au changement d'idéal de connaissance dans la société de la fin du moyen-âge. Il décrit l'apparition d'un idéal de la connaissance par « l'action », opposé à l'idéal d'une connaissance contemplative.

« Ce nouvel idéal énergétique de la connaissance était directement en opposition avec le vieil idéal contemplatif. La plupart des épistémologies antiques et médiévales avaient eu en commun un caractère réceptif : que la connaissance ou la vérité fut atteinte par abstraction à partir des données sensibles, par illumination ou encore par introspection, elle était trouvée et non

construite. Au contraire, explicitement ou non, la plupart des « sciences nouvelles » du XVII^{ème} siècle postulaient une théorie constructive de la connaissance. »

La montée en puissance au XVII^{ème} siècle de la vision mécaniste du monde et de son idéal d'action, vient concrétiser un mouvement en place depuis le XV^{ème} siècle.

Après avoir réunifié la théologie et la raison avec Maïmonide, Averroes et Thomas d'Acquin, l'occident médiéval se met en devoir de prouver les vérités de la foi par les actes et les images. Au règne de la scholastique succède celui de l'optique et de la représentation comme règles de l'action^{5[5]}. Ce rôle croissant de la vision dans l'établissement de la certitude à partir du moyen-âge tardif, commence à peine à être étudié. William Whitney commente ce point dans sa thèse

« Au XV^{ème} siècle, le rôle joué par l'optique dans la codification des idées, dans l'organisation de la syntaxe intellectuelle est central. C'est donc avec la vision, avec ce qui est vu, qu'on est sûr de ce qu'on sait. »

Et de rappeler que des débats scholastiques avaient déjà comme thème central la connaissance par la vision. Ainsi Guillaume d'Ockham déclare :

« Ce qui est représenté doit être connu avant (d'être représenté) ; autrement la représenté ne conduit pas à la connaissance de ce qu'il représente »

Traduisant ainsi un manque de confiance dans la vision et la représentation pures. Manque de confiance reflétant les discussions médiévales sur la psychologie cognitive, dans le cadre complexe de la philosophie aristotélicienne. Discussions dominées par les controverses sur la notion de species (espèce), particulièrement élaboré chez Thomas d'Acquin. L'espèce est ce qui manifeste un être. Les accidents perceptibles d'un être matériel, ses qualités sensibles sont appelés ses espèces. Les espèces ont une existence autonome en ce qu'elles sont émises par l'objet et transmises aux organes de perception. Les discussions portaient sur la réalité de ces espèces et s'interrogeaient sur la manière dont le cerveau acquiert une connaissance véritable, qui est la connaissance non pas des accidents mais la connaissance générale, la connaissance de la quiddité. Dans ce but Thomas suppose une activité connaissante autonome du cerveau. Ce dernier ne se borne pas à recevoir les impressions communiquées par les species, n'a pas un rôle de récepteur purement passif, mais manifeste une activité propre qui permet l'accès à la véritable réalité. Idée qui peut sembler difficile à

soutenir dans le contexte scientifique de l'époque. Il est piquant de remarquer que c'est pourtant une idée de ce genre qui est défendue aujourd'hui par les sciences cognitives de la vision. Ces mécanismes compliqués de la vision n'étaient pas unanimement acceptés, et la décadence de l'influence de la philosophie aristotélicienne a sans doute contribué à leur élimination. Comme l'écrit P. Hamou:

« L'abandon quasi unanime de la doctrine scholastique des espèces intentionnelles est certainement un symptôme important du fait qu'à l'âge classique le cadre conceptuel de la théorie de la perception a subi une mutation profonde »

Cette mutation accompagne la naissance de la science moderne et l'on n'en finirait pas de discuter pour savoir si c'est la mutation scientifique qui entraîne la mutation du regard ou vice-versa. Il n'en reste pas moins que l'on voit la vision devenir le sens dominant du monde moderne au service non plus exclusivement de la religion mais aussi de l'activité socio-économique. Une vision élargie par les procédés et les innovations technologiques : la perspective, les miroirs argentés, le télescope et le microscope.

Une vision du monde commune à l'art et à la science. D'où l'apparition des artistes savants de la Renaissance.

Comme tout mouvement entraîne un contre mouvement, il ne faut pas s'étonner, qu'à la montée en puissance d'une culture visuelle, qui atteindra son paroxysme à l'époque baroque, viennent s'opposer des positions qui jettent l'opprobre sur la vision. Le contre visuel a toujours existé. Témoins les crises iconoclastes dans l'empire byzantin, la réforme cistercienne de saint Bernard au XIII^{ème} siècle ou la réforme protestante.

Aux excès et à l'exubérance de la visualité qui tendaient à accréditer une confusion, sinon une identité, entre le visible et le réel, va s'opposer une intellectualisation, une spiritualisation de la vision. Avec un mouvement parallèle de la science.

A l'enthousiasme de la visualité et des nouvelles technologies qui l'amplifiaient, laissant espérer la constitution d'une physique en acte (ignorant la puissance aristotélicienne), et constituant les fondements mêmes de la science expérimentale, va succéder une reconquête lente de la physique par une pensée platonicienne, sous couvert de mathématiques de plus en plus abstraites et de moins en moins géométriques. Il suffit de rappeler ici que les « Principia Mathematica Philosophiae Naturalis » de Newton abondent de figures alors que moins d'un siècle plus tard la « Mécanique analytique » de Lagrange n'en comporte aucune.

Ces affrontements entre le visuel et le non visuel, l'empirisme et le rationalisme s'expriment dans les quatre grands « programmes scientifiques* » du XVII^{ème} et du XVIII^{ème} siècles.

C'est en voulant dépasser cet antagonisme que Kant va susciter un changement de point de vue révolutionnaire, faisant passer la lumière des projecteurs de la Nature vers l'Homme. Au règne de l'Objet, succède le règne du Sujet connaissant. Kant édifie une théorie philosophique de la connaissance fondée sur un assujettissement du réel au concept.

Ce n'est pas la connaissance qui s'acquiert à partir des objets mais les objets qui se constituent à partir d'une connaissance à priori, qui seule rend la connaissance sensible possible. Le rationalisme et l'empirisme se trouvent ainsi dépassés dans une démarche que Kant qualifie de transcendantale.

Après Kant plus rien ne sera comme avant. L'esprit de la Renaissance est bien loin. Les artistes s'intéressent plus à l'homme et à ses sentiments qu'au spectacle de la nature, et perdent l'intérêt pour une science où la vision joue de moins en moins de rôle. Les mathématiques et la nouvelle logique engagent la science sur des voies abstraites que les artistes ont du mal à suivre. L'art subit des mutations profondes et fait face à des crises d'incompréhension. La science fait peur par ses dérives technologiques et politiques.

Le divorce entre art et science est aujourd'hui réel. Durera-t-il à l'époque informatique où notre univers est à nouveau rempli d'images et où se développent les sciences cognitives* de la vision, la vision artificielle* et l'intelligence artificielle* ? C'est là le défi des décennies à venir.

VISION DU MONDE (Cf. Image du monde*)

VITALISME

ZYGOTE

Produit de la fusion de deux gamètes*, c.a.d. un œuf fertilisé. Autant dire un embryon.

