

MÉTROLOGIE ET APPAREILS DE MESURE

Matière : METROLOGIE ET APPAREILS DE MESURE

Spécialité : 1^{ère} Année GENIE MECANIQUE

Enseignant : FRIJA MOUNIR

Grade : ASSISTANT

Objectifs

- Fournir aux étudiants(es) des techniques propres à l'évaluation et à l'identification des besoins métrologiques.
- Fournir aux étudiants(es) les outils pour évaluer la variabilité des mesures en fonction des exigences.
- Initier les étudiants(es) à la métrologie dimensionnelle. Les étudiants(es) auront l'occasion de mettre en pratique la théorie vue au cours dans le cadre d'exercices et des travaux pratiques.

Objectifs pédagogiques

- Comprendre et identifier les sources d'erreurs et d'incertitude dans le phénomène du mesurage
- Le cours portera une attention spéciale sur la métrologie dimensionnelle et géométrique
- Apprendre à sélectionner, utiliser et gérer les appareils de mesure propres à une vérification donnée.
- Connaître les techniques existantes permettant d'effectuer une étude statistique de reproductibilité et de répétabilité pour un processus de mesure donné.
- Comprendre les principes fondamentaux en étalonnage des instruments de mesure.
- Comprendre et interpréter le tolérancement dimensionnel et géométrique d'une composante mécanique afin de planifier son inspection de manière appropriée.
- Rédaction d'un rapport de mesure.
- Des applications tirées d'études de cas industriels (Applications et exemples pratiques tirés des industries d'aéronautique, de l'automobile, du transport et des produits récréatifs)
- La résolution d'exercices et des problèmes.

I. Travaux dirigés : Deux (2) devoirs et des travaux dirigés permettront aux étudiantes et aux étudiants d'assimiler les notions vues au cours.

II. Travaux pratique : Les travaux pratiques sont constitués de trois manipulations portant sur les techniques d'inspection (appareils conventionnels).

III. Programme du cours

CHAPITRE I : MESURAGE MÉCANIQUE : TERMINOLOGIE ET DÉFINITIONS

- Introduction à la métrologie : Mesurage, grandeur mesurable, méthodes de mesures (direct et indirect), unités de mesures en mesurage mécanique, système de mesure, procédés de mesure.
- Contrôle dimensionnel (par attribut ou par mesurage) : Application des cartes de contrôle et analyse statistique des données en utilisant l'approche maîtrise statistique des processus (MSP)
- Étalonnages des instruments de métrologie : procédures de mise en œuvre (rapport d'étalonnage /constat de vérification)
- La gestion des moyens et des laboratoires de mesure.
- Gestion d'un parc d'appareils de mesure et mise en place de la fonction métrologique dans l'entreprise

CHAPITRE II : CARACTÉRISTIQUES D'UN INSTRUMENT DE MESURE

- Types et caractéristiques des appareils de mesure.
- Incertitudes d'un mesurage (les différentes causes d'erreurs)
- Caractéristiques d'un instrument de mesure : Etendue de mesure, capacité, résolution, précision, sensibilité, fidélité, justesse, classe d'exactitude.
- Choix des appareils de mesure
- Techniques de mesure tridimensionnelles: les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) : principe, avantages et limitations

CHAPITRE III : ESTIMATION DES INCERTITUDES

- Introduction aux incertitudes de mesure : types d'erreurs et classification (erreurs aléatoires et erreurs systématiques)
- Les modes d'évaluation des incertitudes de mesure
- Loi de composition des incertitudes de mesure (Normale, Uniforme, Arcsin)
- Détermination et calcul de différents types d'erreurs (aléatoire et systématiques)

CHAPITRE IV : DIMENSION ET TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES

- les symboles et les règles fondamentales (enveloppe, cumul, modificateurs, référentiels)
- les tolérances de forme, les systèmes de référence, les tolérances d'orientation et de localisation et les tolérances d'alignement circulaire, battements).

CHAPITRE I : MESURAGE MECANIQUE

TERMINOLOGIE ET DEFINITIONS

Introduction à la métrologie

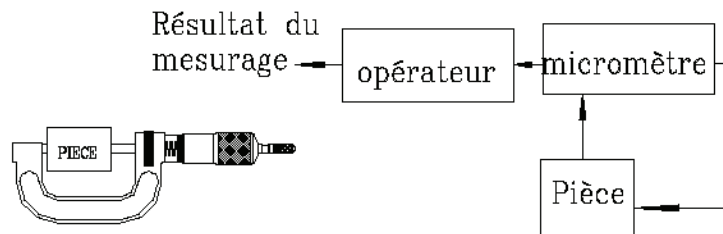
- 1- **METROLOGIE** : C'est le domaine des connaissances relatives au mesurage. Il englobe tous les aspects aussi bien théoriques que pratiques quelque soit la nature de la science et de la technologie développée.
- 2- **MESURAGE** : C'est l'ensemble des opérations permettant d'attribuer une valeur à la grandeur mesuré.
- 3- **GRANDEUR MESURABLE** : C'est une caractéristique d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement par un nom (en métrologie dimensionnelle : Distance, Angle..) et déterminé qualitativement par une valeur (nombre exprimé dans l'unité choisie).
- 4- **METHODE DE MESURE** : C'est une succession logique d'opérations décrites d'une manière succente permettant de la mise en œuvre de mesurage.

4.1- Méthode direct : C'est le relevé d'une dimension à partir d'une référence. La précision et la grandeur de dimension influent sur le choix de la référence.

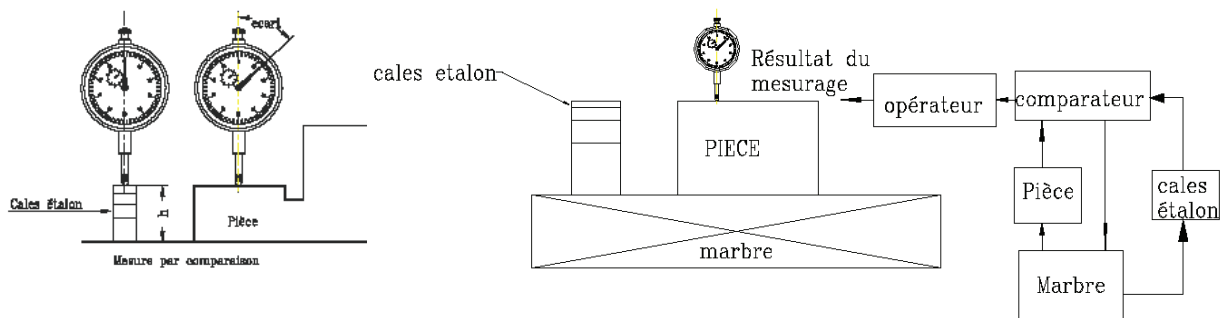
EXP : Appareil à trait : Mètre

Appareil à vernier : Pied à coulisse

Appareil à vis micrométrique : Micromètre



4.2- Méthode indirect : C'est le relevé à l'aide d'un capteur de l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence).

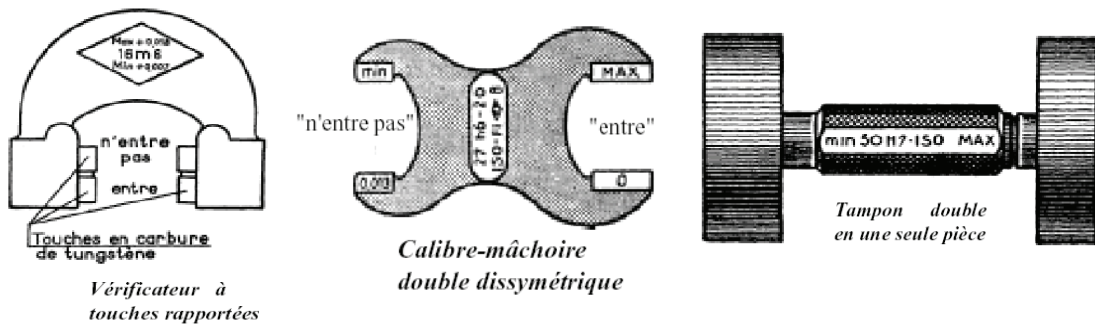


$$L_{\text{pièce}} = L_{\text{étalon}} + \alpha \quad \text{avec } (L_{\text{pièce}} : \text{Longueur pièce}, L_{\text{étalon}} : \text{Longueur étalon}, \alpha : \text{Ecart mesuré})$$

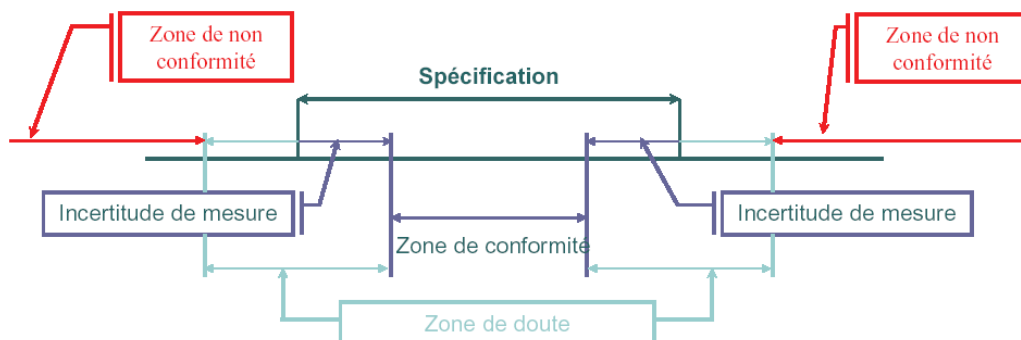
- 5- **DIMENSION** : C'est la distance la plus courte entre deux points réelles ou fictifs
Exp. : Un diamètre, un altviltage, un entraxe.
- 6- **MESURANDE** : C'est la grandeur particulière soumise du mesurage (Exp. : Température, Pression, Dimension...)
- 7- **RESULTAT DE MESURAGE** : C'est la valeur attribué au grandeur (à la mesurande) obtenue par mesurage. Une expression complète doit contenir la valeur et une information sur l'incertitude.
- 8- **CONTROLE DIMENSIONNEL** : C'est l'ensemble des opérations permettant de déterminer si la valeur d'une grandeur se trouve bien entre les limites de tolérance qui lui sont imposées. On distingue deux types de contrôle :

8-1. le contrôle par attribut: Il est limité à une simple vérification de conformité (réponse par oui ou non, pas de mesurage)

Applications : calibres fixes, montages de contrôle, plaquettes visco-tactiles



8-2. le contrôle par mesure: Où l'on procède d'abord à un ou plusieurs mesurages pour quantifier les grandeurs et ensuite à une comparaison des valeurs mesurées avec les spécifications demandées. Pour palier à ce problème, la norme ISO 14253-1 préconise de déduire de la spécification l'incertitude de mesure



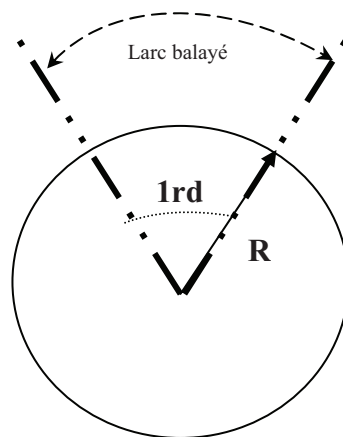
Application des cartes de contrôle et analyse statistique des données en utilisant l'approche maîtrise statistique des processus (MSP) (Voir Annexe)

9- UNITE DE MESURE :

Mètre : L'unité de base de longueur. Mais conventionnellement on utilise le (mm).

L'angle : (rd) 1 radian : C'est l'équivalent de l'angle qui sur une circonférence ayant pour centre le sommet de l'angle interceptant entre ses cotés un arc d'une longueur égale à celle de rayon.

$$1rd = \{ \text{Longueur Arc balayé} = R \}$$



10- VALEUR VRAIE : C'est la valeur qui caractérise une grandeur parfaitement définie dans les conditions qui existent lorsque cette grandeur est considérée. Il s'agit d'une notion idéale, la valeur vraie ne peut être connue exactement et ceci quelle que soit la précision des moyens de métrologie utilisés.

11- VALEUR CONVENTIONNELLEMENT VRAIE : C'est la valeur d'une grandeur que l'on substitue à la valeur vraie. La valeur conventionnellement vraie est considérée comme suffisamment proche de la valeur vraie pour que l'on considère que la différence (entre ces deux valeurs) n'est plus significative pour l'utilisation que l'on veut en faire.

Exemples :

- valeur mesurée avec une très grande précision dans un laboratoire de métrologie.
- valeur indiquée sur une cale étalon.



12- ETALONNAGE : C'est l'ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée. (Voir Annexe rapport de calibration)

13- ETALON : Mesure matérialisée, appareil de mesure ou système de mesure, destinés à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs connues d'une grandeur pour les transmettre par comparaison à d'autres instruments de mesure.

le principe de classification des boites de cale étalons : 4 Classes.

La classification est suivants l'incertitude sur la longueur de cale étalon mesuré)

(4 Classes : Classe 0 ; Classe 1 ; Classe 2 ; Classe3)

Série 516



516-943-10

Caractéristiques techniques

Précision : NF EN ISO 3650

Classe : K

Pour laboratoires

Classe : 0

Comme étalon pour le contrôle des cales de travail, pour la mise au point d'instruments de mesure avec une précision élevée. Etalons de référence de l'entreprise, pour laboratoires.

Classe : 1

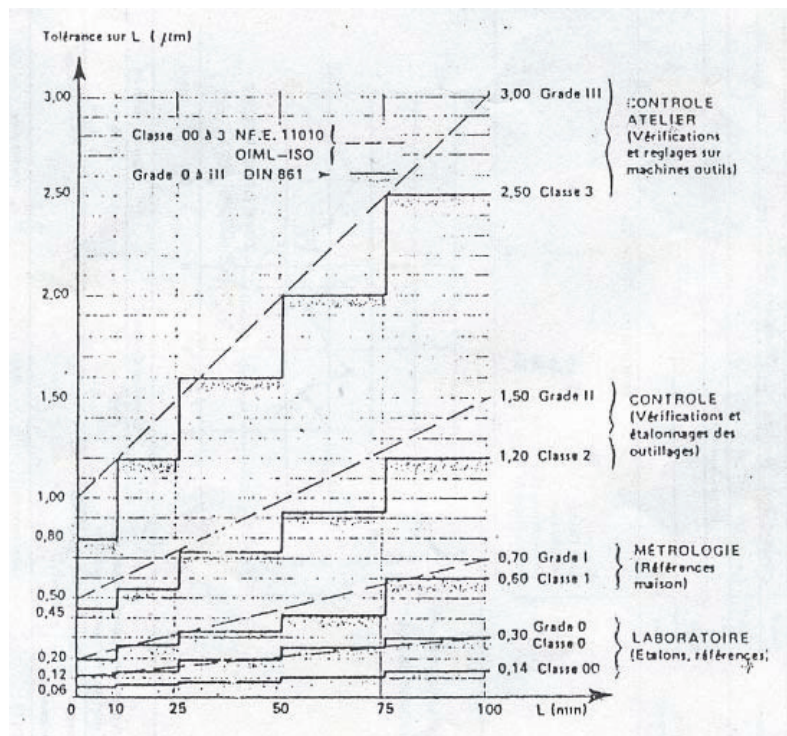
Pour le contrôle des cales et calibres d'essai et pour la mise au point des instruments de mesure linéaire pour un travail de précision.

Classe : 2

Pour la mise au point ou le contrôle des instruments pour l'ajustement des outillages, des dispositifs ou des machines.

Les jeux de cales de la classe K sont livrés avec un certificat RVA (équivalent COFRAC).

Les autres jeux de cales peuvent être livrés avec un certificat RVA (équivalent COFRAC), nous consulter.



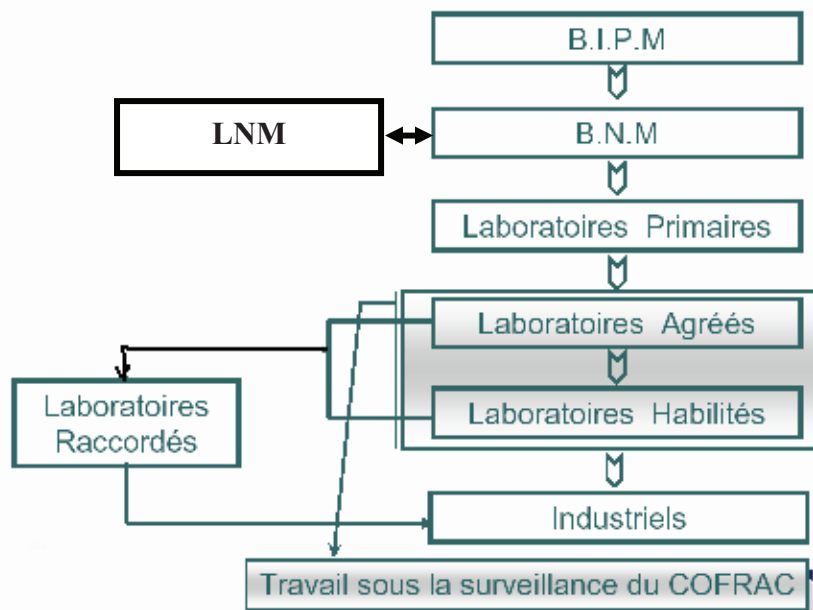
14- SYSTEME DE MESURE : C'est un ensemble des instruments de mesure assemblé pour faire un mesurage spécifique. Un système de mesure à demeure (non portable) est appelé installation de Mesure.

15- PROCEDES DE MESURE : l'instrument de mesure ne qu'un maillon dans le processus d'obtention d'un résultat de mesurage. Le procédé peut se définir comme l'ensemble constitué par :

- Un principe de mesure
- La Méthode de mesurage
- Mode opératoire
- Instrumentation adéquate
- Des étalons
- Un environnement (Température, Pression, humidité, vibration .etc.)

Le procédé de mesure permet l'obtention d'un produit qui est le résultat de mesurage.

16-GESTION DES MOYENS DE MESURE : Lors de mesurage intervient une grandeur de référence, la normalisation actuelle oblige que ces grandeurs de référence soient les mêmes aussi bien en Tunisie que dans autres coins de monde.



B.I.P.M : Bureau International des Poids et Mesures, Son rôle est d'assurer la cohérence du système d'unités au niveau de l'ensemble des pays adhérents.

BNM : Bureau National de Métrologie, Son rôle est d'assurer la cohérence du système d'unités au niveau national.

LNM : Laboratoire National de Métrologie, Son rôle est : o De conserver les étalons nationaux, o De travailler à l'amélioration des étalons

Laboratoires Agréés: Leur rôle est : o D'assurer le raccordement des étalons industriels Dans le domaine Dimensionnel, 2 laboratoires :

- o L.N.E (Laboratoire National d'Essais)
- o C.T.A (Centre Technique de l'Armement)

Laboratoires Habilités: Leur rôle est : o D'assurer le raccordement des étalons industriels

COFRAC : Comité Français d'Accréditation : Au niveau des laboratoires (agrés ou habilités), le COFRAC a pour mission de s'assurer que les quatre conditions sine qua non à la conformité d'une prestation d'étalonnage ou de vérification sont respectées par le laboratoire.

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES D'UN INSTRUMENT DE MESURE

I- Incertitude de Mesurage

L'incertitude de mesurage est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande

- Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.
- L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écart-types, sont évaluées en admettant des distributions de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations

Différents facteurs influent sur un résultat de mesurage. Ce qui engendre des erreurs d'incertitudes. On cite à titre d'exemple les cinq facteurs suivants :

- Environnement,
- Méthode de mesurage
- Opérateur,
- Pièce à mesurer,
- Appareil de Mesure.

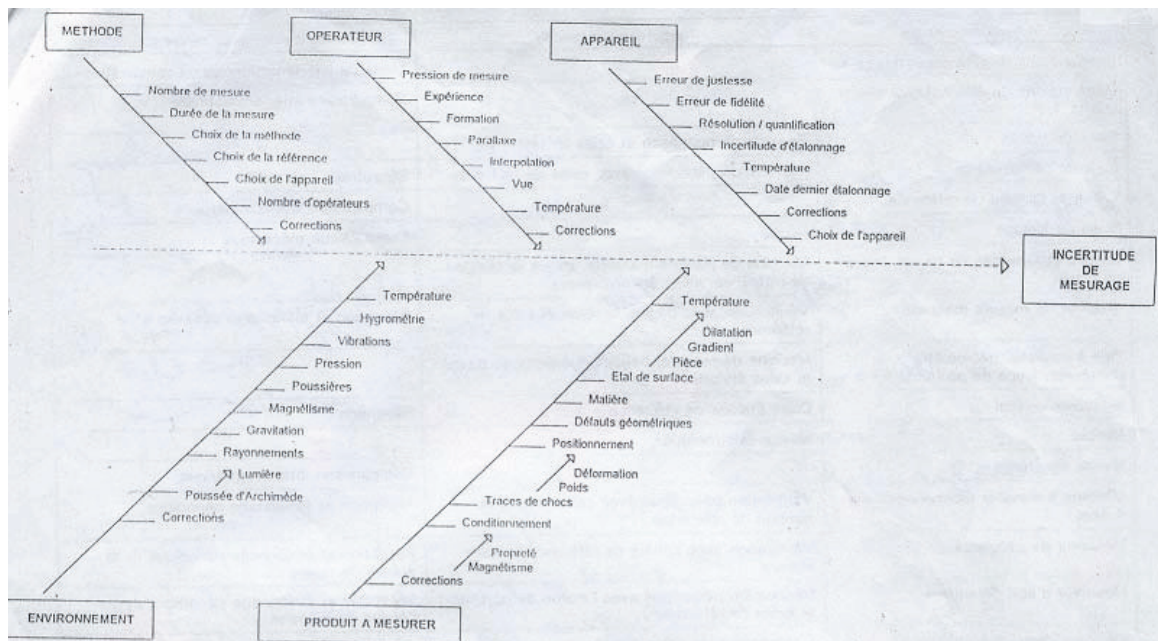
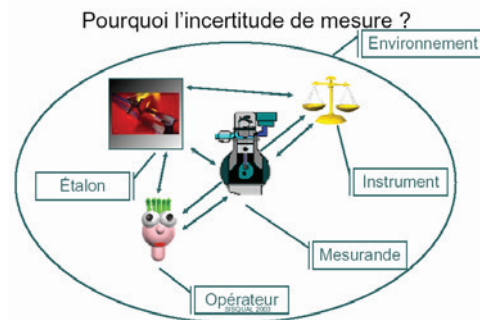


Diagramme Causes-Effet d'incertitude de mesurage

II- Principaux caractéristiques d'un instrument de mesure.

1- Etendue de Mesure (Capacité) : ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée maintenue entre des limites spécifiées. Les limites supérieures et inférieures de l'étendue spécifiée sont parfois appelées respectivement «portée maximale» et «portée minimale».

2- Résolution : C'est la plus petite différence d'un dispositif afficheur qui peut être aperçue d'une manière significatif. Pour les appareils à affichage numérique, on considère que le dernier chiffre affiché est connu à une unité près.

Exemples :

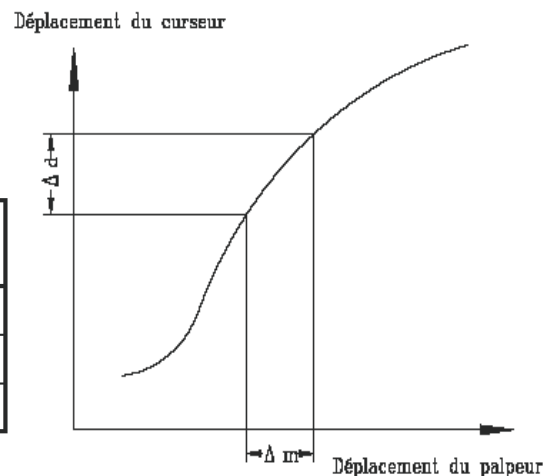
N°	Désignation des instruments de mesurage	Résolution (mm)
1	Réglet	0.5
2	Calibre à coulisse à vernier	0.02
3	Calibre à coulisse digital	0.01

3- Sensibilité : C'est le quotient de l'accroissement de la réponse par l'accroissement de signal d'entrée.

Rapport entre l'accroissement de la réponse (Δd) sur l'accroissement de la grandeur mesurée (Δm) :

$$S = \Delta d / \Delta m$$

N°	Désignation des instruments de mesurage	Dimensions	Sensibilité
1	Réglet		1
2	Calibre à coulisse		1
3	Micromètre à vernier	D tambour=15.9	1/0.01 = 100



D tambour = 15.9 -> Circonférence du tambour = $\pi \cdot 15.9 = 50$ mm

Un tour de tambour = 50 graduations -> déplacement du curseur/une graduation = 1mm

Déplacement du curseur entre deux graduations = 1mm

Sensibilité = déplacement du curseur / variation de la grandeur mesurée = 1mm / 0.01mm = 100

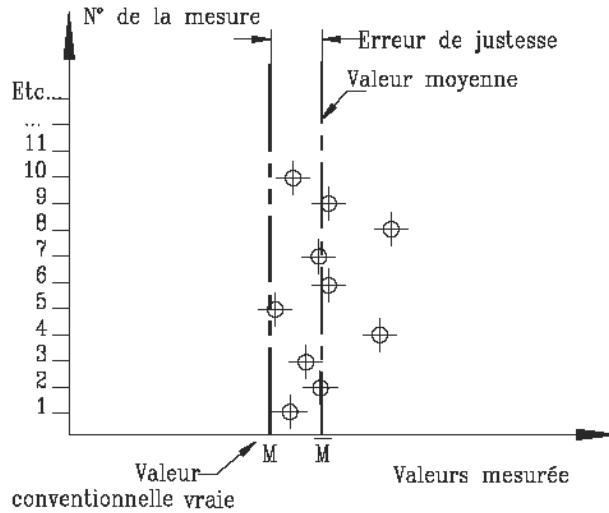
Dans la pratique, Δd se traduit par le déplacement relatif à la valeur d'un index, et Δm correspond au déplacement réel nécessaire à provoquer la variation Δd . La sensibilité peut dépendre de la valeur du signal d'entrée. La sensibilité d'une chaîne de mesure est égale au produit des sensibilités des divers éléments de la chaîne.

4- Justesse : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

Erreur de justesse de l'instrument : L'erreur de justesse dépend de la qualité de fabrication de l'instrument : C'est la composante **systematique** de l'erreur d'un instrument de mesure (paramètre de position).

$$J = M - \bar{M} \quad \text{avec} \quad \bar{M} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} M_i$$

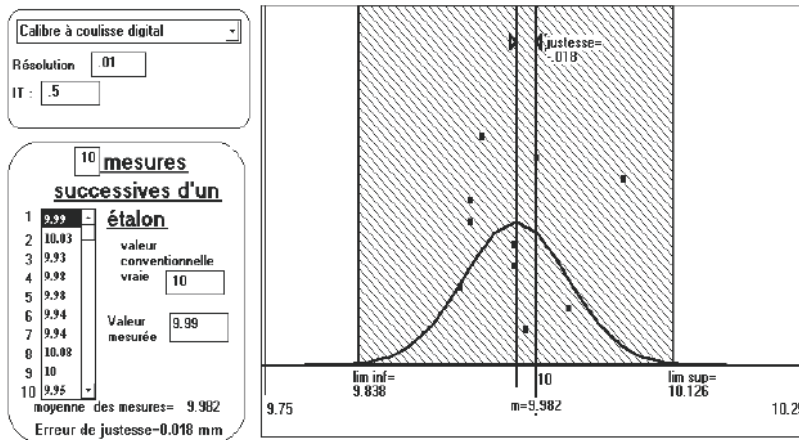
J : erreur de justesse
 M : moyenne arithmétique des n valeurs mesurées M_i .
 \bar{M} : valeur conventionnellement vraie



Exemples :

- erreur de zéro : indication de l'instrument, pour la valeur zéro de la grandeur mesurée.
- défauts géométriques (forme, orientation) du palpeur
- qualité des guidages : écarts géométriques de trajectoire (petites translations et petites rotations) au cours du déplacement du capteur (élément mobile de l'instrument).
- erreur d'amplification de l'instrument (inégalité du pas de vis d'un micromètre, ou des dentures des roues d'un comparateur...).
- erreur d'affichage de l'instrument (inégalité entre les graduations...).

Application :



La valeur conventionnellement vraie est obtenue par l'épaisseur d'une cale étalon de 10 mm. Dix mesures de cette cale ont été réalisées après un étalonnage à 0 .
 La valeur moyenne des 10 valeurs mesurées est de 9.982 mm .

L'erreur de justesse de cet instrument après étalonnage au zéro et pour une mesure de 10 mm peut être estimée à 0.018 mm

5- Fidélité : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée de la même mesurante dans les mêmes conditions de mesure qui comprennent :

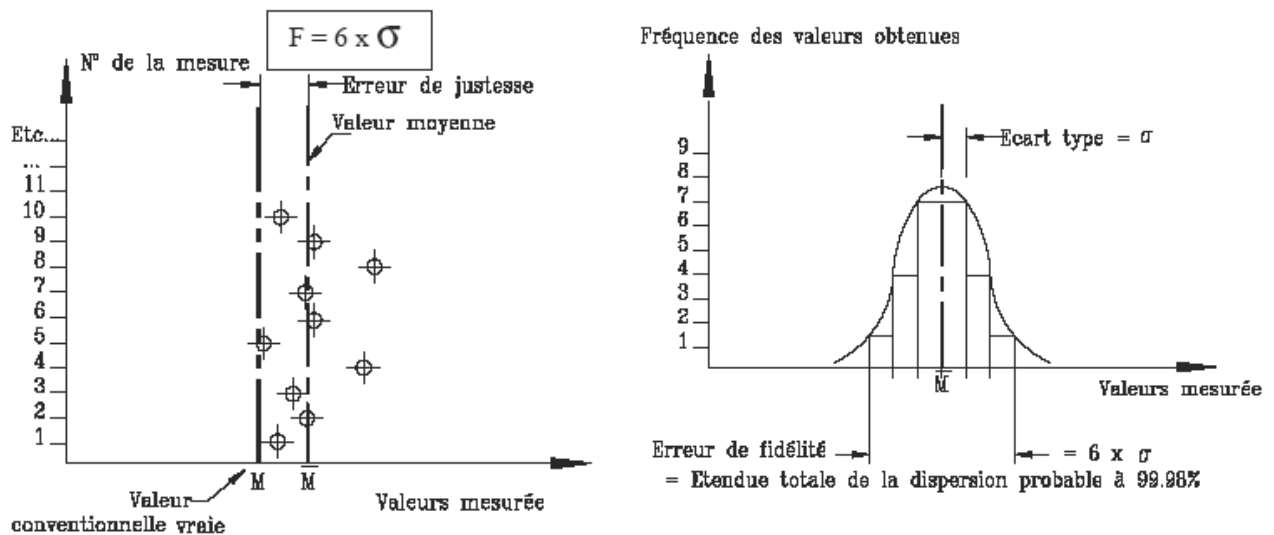
- Réduction en minimum de variation du à l'observateur
- Même observateur
- Même mode opératoire (Même instrument, même condition de mesure)
- Même lieu
- Répétition durant une constante période de temps

- jeux (coulissement, articulations)
- pression de contact plus ou moins grande entraînant des déformations

C'est la composante **aléatoire** de l'erreur d'un instrument de mesure (paramètre de dispersion). Elle représente la dispersion des mesures M_i d'une même grandeur et elle est caractérisée par son écart-type estimé :

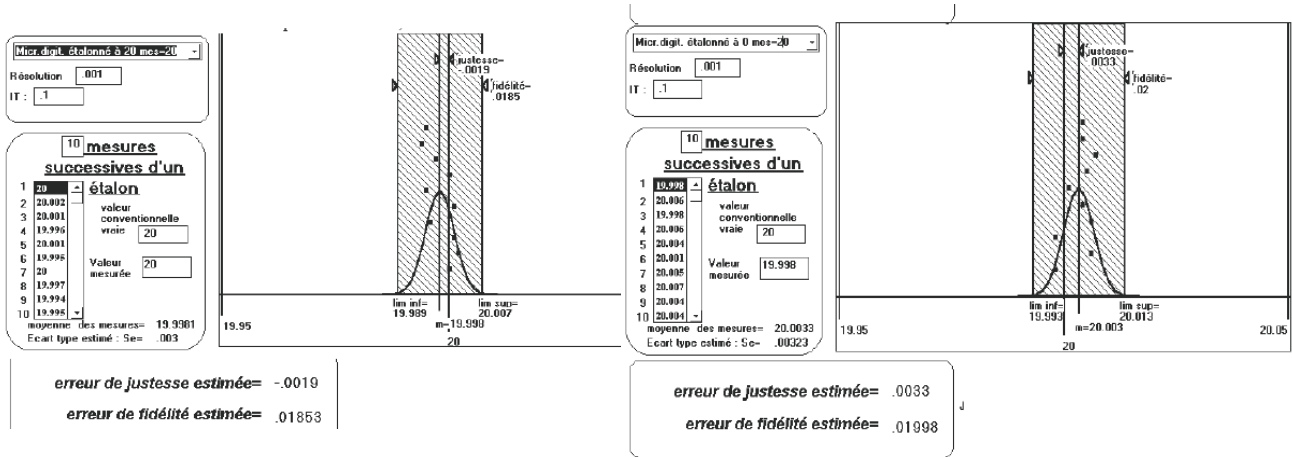
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{i=n} (M_i - \bar{M})^2}$$

L'erreur de fidélité est égal à 6 fois la valeur de l'écart type :



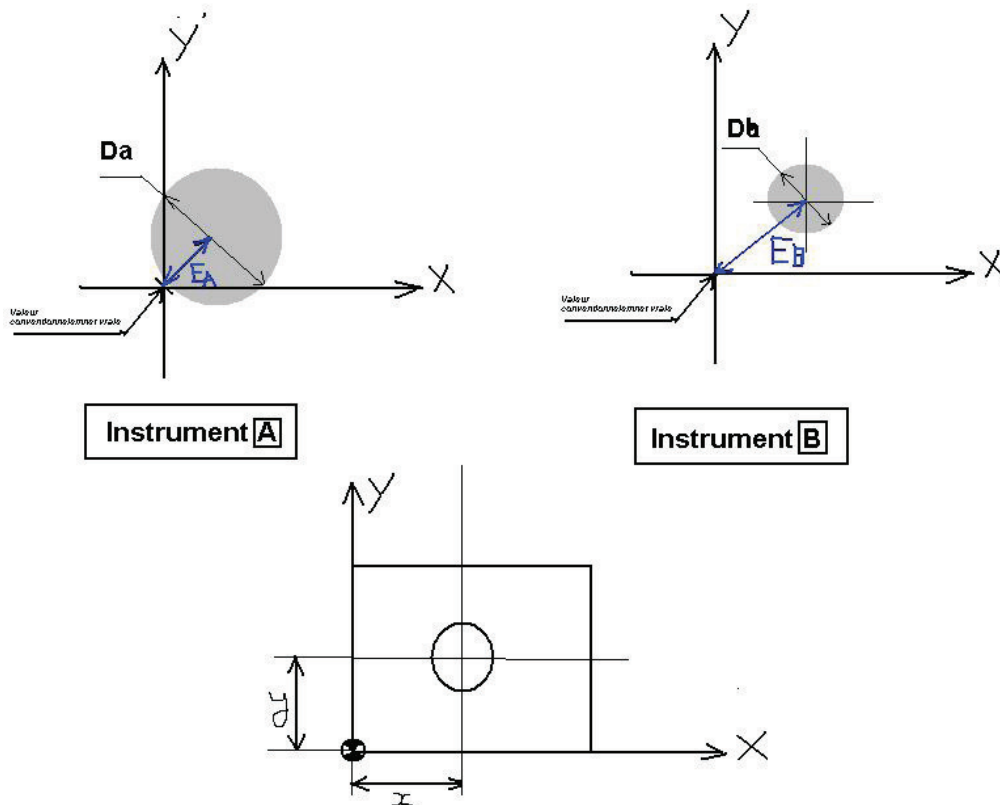
Application :

Nous avons effectué deux séries de 10 mesures sur une cale étalon de 20mm
 Le premier a été effectué après l'étalonnage de l'appareil sur cette même cale.
 Le deuxième a été effectué après mise à zéro , les deux touches en contact.



Les résultats obtenus nous montrent que dans les deux cas, l'erreur de fidélité est proche de 2/100 de mm (écart type estimé proche de 3 microns). Par contre après étalonnage, l'erreur de justesse (proche de 2 microns) est nettement plus faible que sans étalonnage (3.3 microns)

Erreur systématique : C'est la moyenne qui résulterait d'un nombre finie de mesurage de même mesurante effectué dans les conditions de répétitivité moins la valeur vraie de mesurante (Conventionnellement vraie). L'erreur systématique et ses causes peuvent être déterminé complètement.



- La dispersion D représente l'erreur de fidélité: $D_b < D_a \rightarrow$ L'instrument B est plus fidèle que A.
- L'écart E entre la moyenne arithmétique et la valeur vraie conventionnellement représente L'erreur de Justesse (E_a, E_b)

- 6- Répétabilité :** Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur dans des conditions identiques (même opérateur, même lieu, mesures effectuées successivement dans une courte période de temps, même méthode).
- 7- Reproductibilité :** Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur en faisant varier les conditions (changement d'opérateur, de lieu, de temps, de méthode).
- 8- Exactitude :** Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie d'une grandeur mesurée. L'exactitude représente la qualité globale de l'instrument, dans des conditions données. L'erreur d'exactitude comprend l'erreur de justesse et l'erreur de fidélité. L'exactitude correspond à l'incertitude de mesure de l'instrument.

$$\text{Incertitude de mesure} = |J| \pm 3 \times \sigma$$

Si l'erreur de justesse est connue, la valeur obtenue par la mesure sera corrigée de la valeur de l'erreur de justesse et l'incertitude de l'instrument de mesure sera égale à :

$$I_m = \pm 3 \times \sigma = 6 \times \sigma$$

- 9- Classe de précision :** La classe d'un instrument de mesure ; c'est l'aptitude à satisfaire à certaines exigences d'applications métrologiques destiné à conserver les erreurs dans des limites spécifiés. Habituellement la classe est désignée par un chiffre ou une lettre adoptée par convention.

C'est une caractéristique des instruments de mesure qui sont soumis aux mêmes conditions d'exactitude.

La classe s'exprime :

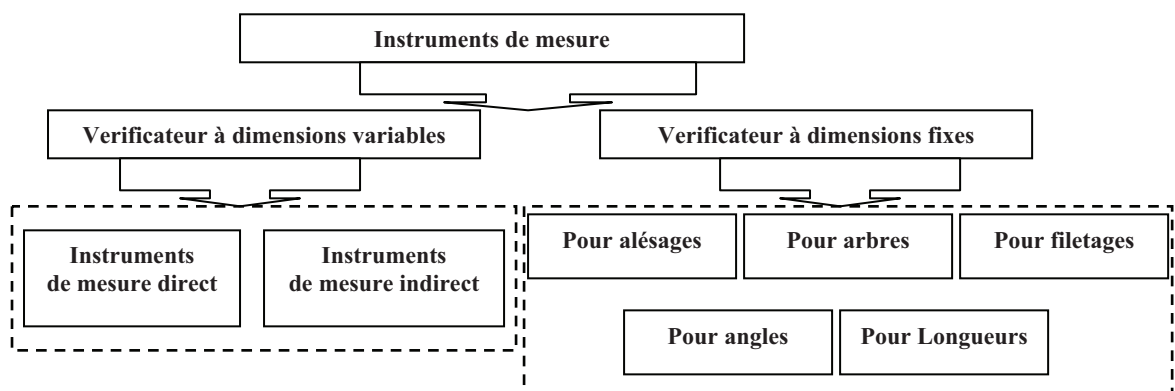
- Soit par le pourcentage de la plus grande indication que peut fournir l'instrument.

Par exemple un micromètre 0-25 de classe 0.04 donnera une indication dont l'exactitude est de $(25 \times 0.04)/100 = 0.01\text{mm}$.

- Soit par un repère définissant, pour une dimension nominale donnée, l'exactitude attendue (cales étalon)..

III- Classification des instrument de mesure

Les instruments de mesure se divisent en deux grandes classes :

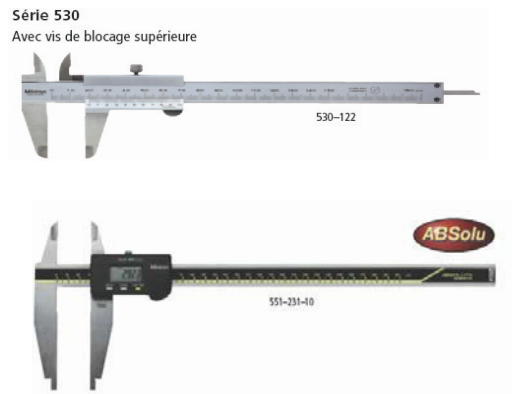


1- Vérificateur à dimensions variables

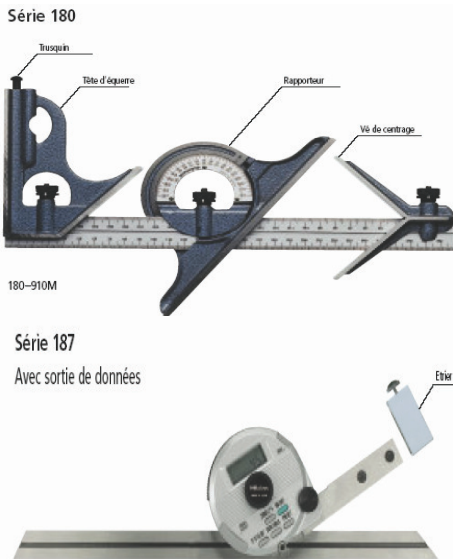
1.1 : Instruments de mesure direct



Colone de mesure & Trusquin



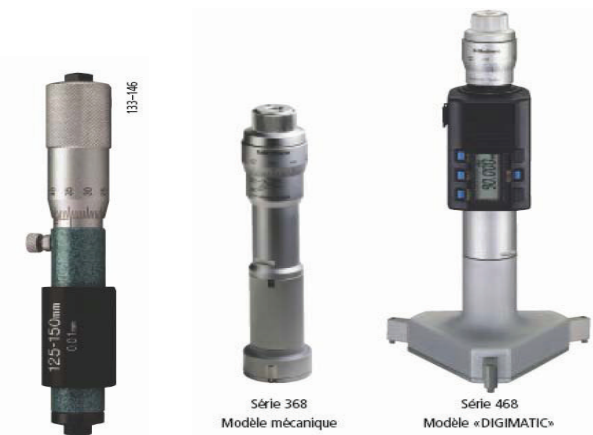
Pieds à coulisses



Rapporteur



Jauges de profondeur



Micromètres & jauges micrométriques

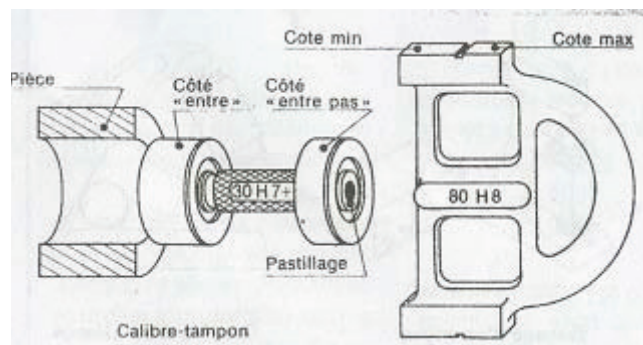


1.2 : Instruments de mesure indirect

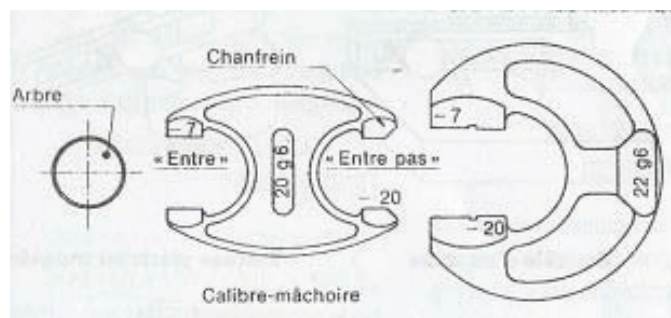


2- Vérificateur à dimension fixe

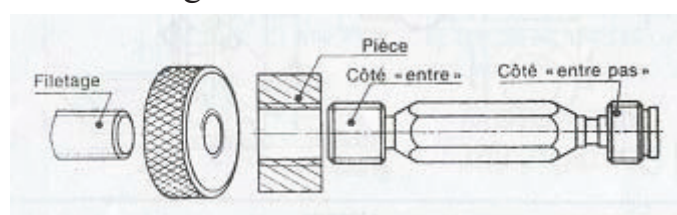
2.1- Pour Alésages



2.2- Pour Arbres



2.3- Pour filetages



2.4- Pour Angles

Série 916



916-110

2.5- Pour Longueurs

Série 516



516-943-10

Le choix de l'instrument de mesure adéquat pour une opération de mesurage s'effectue selon des critères bien définis. Les paramètres de choix sont :

- les caractéristiques de l'instrument de mesure : Capacité, Classe de précision, fidélité, justesse...ect
- Mode Opérateur
- Matériau de la pièce à mesurer (Acier, Plastique ..ect)
-

IV- Machines à mesurer tridimensionnelles

1- Aperçue historique

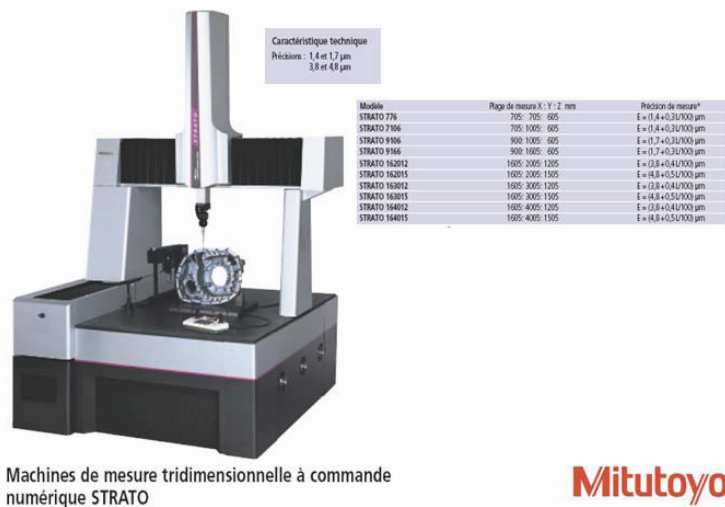
Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) sont nées au début des années soixante et se sont vraiment développées après l'invention du palpeur à déclenchement en 1970. Les principaux concepts qui régissent la mise en œuvre et l'exploitation de ces machines sont en place depuis le début des années quatre-vingt. Voici quelques exemples des MMT.

2- Principe général

Une MMT est une machine à saisir et traiter de l'information. Un palpeur se déplace grâce à trois glissières de directions orthogonales et vient au contact des surfaces réelles.

Lors de chaque accostage, le calculateur mémorise les coordonnées X, Y et Z du centre de la sphère de palpation (dans le cas fréquent où le palpeur se termine par une petite sphère). Les points palpés permettent de déterminer une image de la surface réelle.

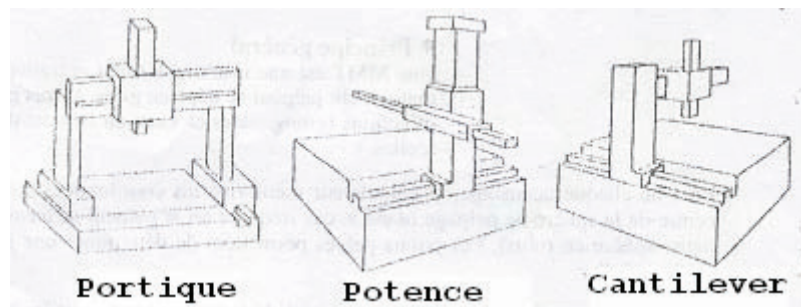
A partir des coordonnées saisies, le logiciel de traitement des données va effectuer des opérations mathématiques visant à rechercher les valeurs des dimensions ou des spécifications que l'on cherche à connaître ou à contrôler. Ce traitement mathématique tend à se rapprocher de plus en plus des exigences des normes sans toujours les respecter totalement.



3- Architecture des Machines à Mesurer Tridimensionnelles

Les architectures les plus fréquemment utilisés sont :

- La structure potence : assez bien adaptée aux grands volumes. Elle permet d'accéder à toutes les faces de la pièce mais la flexion du bras lui donne une précision limitée.
- La structure cantilever : Particulièrement adaptée aux petites capacités de mesure, elle permet un bon accès à la pièce.
- La structure portique : c'est de loin la plus répandue. Elle permet de traiter de grands volumes et d'accéder aisément aux surfaces.



4- Dispositif de palpation

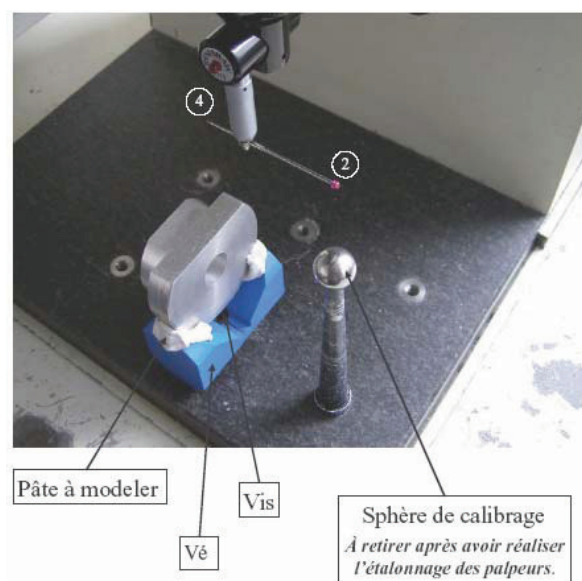
Il existe deux types de têtes de palpation

- Les têtes de palpation dynamique : au moment du contact entre le palpeur et la surface palpée, se produit dans la tête une rupture de contact électrique qui déclenche l'ordre de lecture de la position de la sphère située à l'extrémité du palpeur (en coordonnées X, Y, Z)
- Les têtes de palpation statique : Le palpeur actionne trois capteurs internes à la tête, qui délivrent en continu des informations sur la situation de la partie active du palpeur. Ces informations permettent le pilotage des moteurs actionnant les différents mouvements de la machine et permettent donc un palpation en continu des surfaces.



5- Avantages et limitations

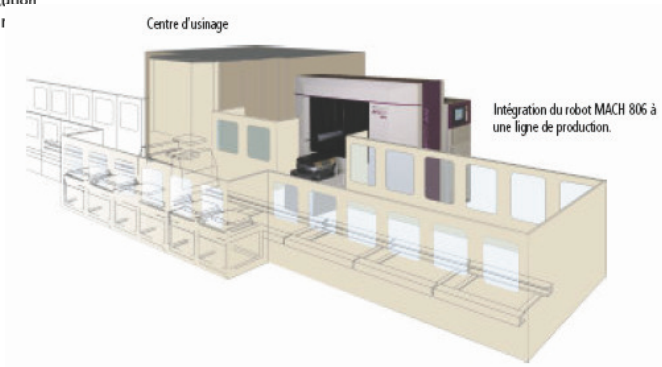
- Rugueur de mesurage
- Incertitudes de mesurage
- Capacité de mesurage
- Productivité
- Rentabilité



Mise en position de la pièce sur la MMT & palpeurs utilisés

Robots de mesure tridimensionnelle à commande numérique MACH

Stabilité optimale, capacité de charge considérable et très grande vitesse d'exécution (1800 mm/s) sont les principales caractéristiques de cette machine à commande numérique parfaitement adaptée à une intégration en ligne de production.



Modèle	Plage de mesure X : Y : Z mm	Précision de mesure	Plage de températures
MACH 403	460: 460: 300	E = (3,5 + 0,4L/100) µm E = (5,0 + 0,5L/100) µm	15 à 25 °C 10 à 35 °C
MACH 806	1021: 818: 615	E = (3,5 + 0,4L/100) µm E = (5,0 + 0,5L/100) µm	15 à 25 °C 10 à 35 °C

Mitutoyo

CHAPITRE III : ESTIMATION DES INCERTITUDES

1- Définition : C'est un paramètre associé aux résultats de mesure qui caractérise la dispersion des valeurs pouvant être attribuées au mesurande. Cette incertitude peut être un écart type ou un multiple de l'écart type ou la demi largeur de l'intervalle de confiance.

2- Erreur de Mesure (E_M): C'est le résultat de Mesure (R_M) moins la valeur vraie (VV) de mesurande.

$$E_M = R_M - VV$$

3- Erreur relative (E_R): C'est le rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie de mesurande.

$$E_R = E_M / VV$$

4- Types des erreurs :

- Erreur systématique (E_S) : Elle se reproduit en valeur absolue et en signe. Elle est pratiquement constante. On évolue régulièrement en fonction de condition de mesure.
- Erreur aléatoire (E_A) : Elle fluctue d'une manière imprévisible lorsqu'on répète le mesurande. Pratiquement, on considère que la dispersion est normale.

$$E = E_A + E_S$$

5- Procédé de détermination d'erreurs de mesure

5-1 : Détermination de l'erreur Aléatoire

On procède à N mesures ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_i, \dots, Y_n$) $\Rightarrow \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$

L'erreur aléatoire $E_A = \sigma_Y^{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$ (Ecart type)

Cette évaluation repose sur l'indépendance de différents résultats de Mesure. Pour cela chaque opération de Mesure doit inclure le démontage et le remontage de produit à mesurer.

5-2 : Détermination des erreurs systématiques :

L'évaluation de l'erreur systématique est liée à la maîtrise de processus de mesure et à l'expérience de l'opérateur, ces erreurs peuvent être notamment déterminées à partir :

- Documentation de constructeur de l'appareil de mesure
- Résultat d'étalonnage et de vérification

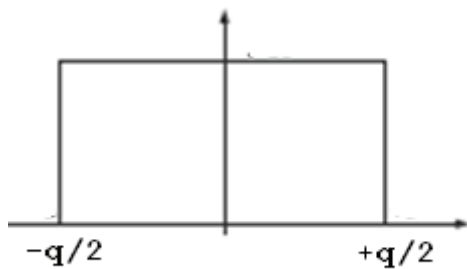
- Une qualification des instruments utilisés
- Une modélisation mathématique exprimant l'influence du paramètre identifié sur le résultat de mesurage.

5-2.1 : Erreur systématique due à la résolution de l'instrument de mesure

Si on désigne q = la résolution de l'instrument de mesure

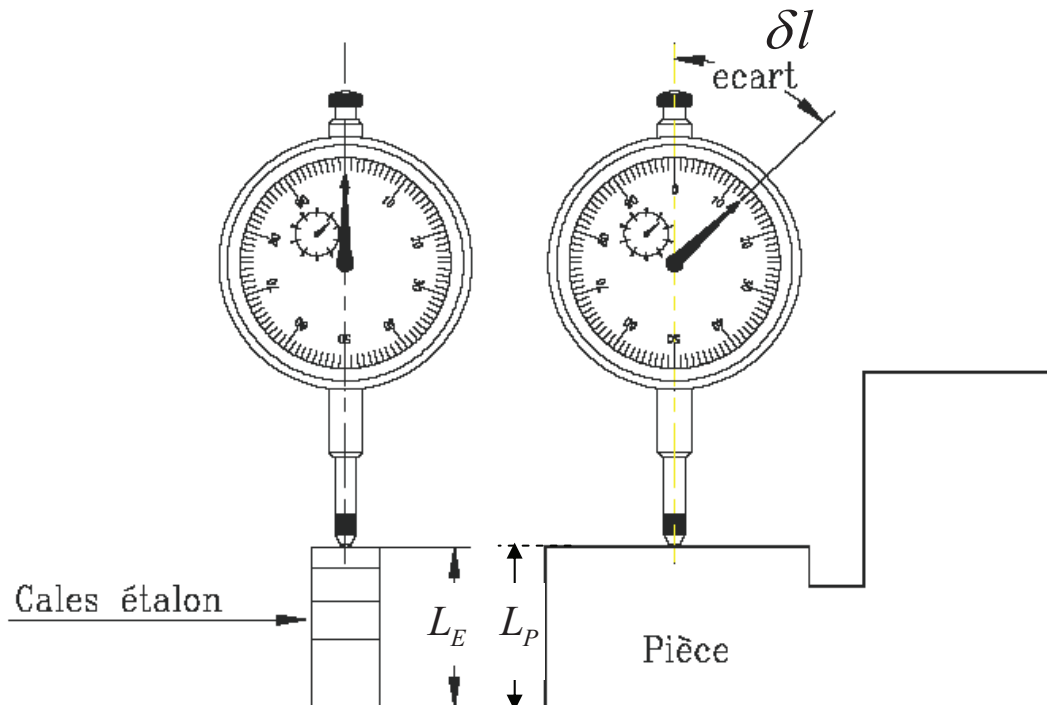
Exp. : Pied à coulisse $2/100 = 0.02$ mm $\implies q = 0,02$ mm

La résolution suit une loi uniforme centrée.

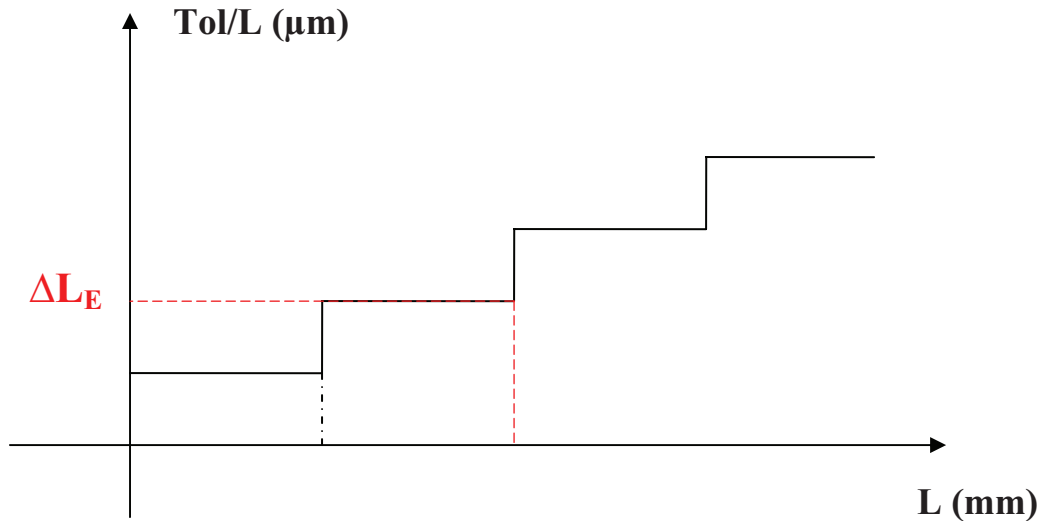


$$E_s^{R\acute{e}s} = \frac{q}{\sqrt{3}}$$

5-2.2 : Erreur systématique due à l'étalon

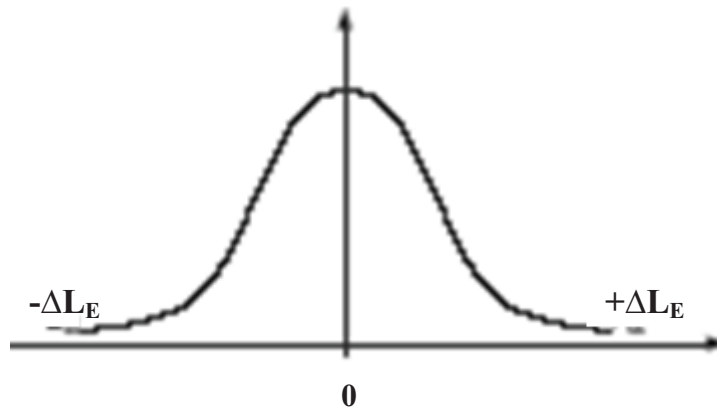


$$L_p = L_E + \delta l$$



Erreur sur longueur des cales

D’après le graphique ci-dessus, on remarque que pour chaque longueur du cale étalon on enregistre un erreur relatif ΔL_E . Cet erreur est soumise à une dispersion comprise dans un intervalle $[-\Delta L_E, +\Delta L_E]$ La distribution de la dispersion enregistré peut suivre un des loi de distribution . Si on prend par exemple la distribution normale centrée suivante :



Donc la valeur de l’erreur systématique due à l’étalon s’écrit :

$$E_s^{Etalon} = \frac{\Delta L_E}{3}$$

5-2.3 : Erreur systématique due à la Température

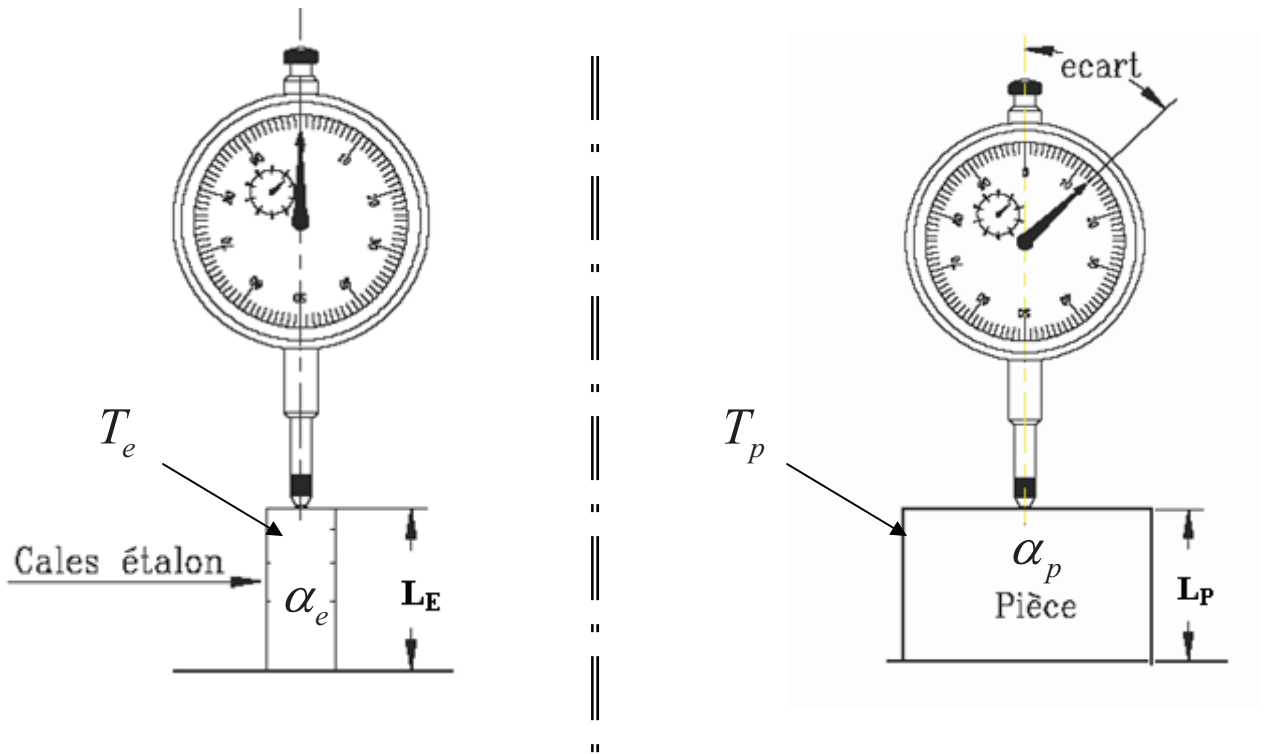
Exemple : On travail dans un laboratoire dont la Température égale 32°C

$$X_{0(25^\circ C)} = 28,3 \text{ mm}$$

$$X_{1(32^\circ C)} = 28,3 + \varepsilon_T$$

Avec X_0 Longueur de la pièce à la température de référence $T_0 = T_{Ref} = 25^\circ C$

ε_T La correction de l'erreur systématique due à la température



Condition de référence ($T_{ref} = T_0$) ($L_E = L_0$; $L_p = L_{p0}$)

(1)

$$\Delta L_E = L_0 \alpha_e (T_e - T_0)$$

(2)

$$\Delta L_p = L_{p0} \alpha_p (T_p - T_0)$$

Avec α_e : Coefficient de dilatation thermique du matériau de l'étalon

L_0 : Longueur de l'étalon à T_0

α_p : Coefficient de dilatation thermique du matériau de la pièce

L_{p0} : Longueur de la pièce à T_0

$$L_p = L_E + \delta l \implies \Delta L_p = \Delta L_E + \varepsilon_T$$

$$\varepsilon_T = \Delta L_p - \Delta L_E$$

$$\varepsilon_T = \boxed{(2)} - \boxed{(1)}$$

$$\varepsilon_T = L_{p0} \alpha_p (T_p - T_0) - L_0 \alpha_e (T_e - T_0)$$

La correction de l'erreur systématique due à la température ε_T

$$\varepsilon_T = L_0 (\alpha_p \Delta T_p - \alpha_e \Delta T_e)$$

Cas	Coef dilatation Etalon /Pièce $\alpha_e ; \alpha_p$	Température $\Delta T_e ; \Delta T_p$	La correction ε_T
1	$\alpha_e \neq \alpha_p$	$\Delta T_e \neq 0 ; \Delta T_p \neq 0$	$L_0 (\alpha_p \Delta T_p - \alpha_e \Delta T_e)$
2	$\alpha_e \neq \alpha_p$	$\Delta T_e = \Delta T_p = \Delta T$	$L_0 \Delta T (\alpha_p - \alpha_e)$
3	$\alpha_e \neq \alpha_p$	$\Delta T_e = \Delta T_p = 0$	0
4	$\alpha_e = \alpha_p = \alpha$	$\Delta T_e \neq 0 ; \Delta T_p \neq 0$	$L_0 \alpha (\Delta T_p - \Delta T_e)$
5	$\alpha_e = \alpha_p = \alpha$	$\Delta T_e = \Delta T_p = \Delta T$	0
6	$\alpha_e = \alpha_p = \alpha$	$\Delta T_e = \Delta T_p = 0$	0

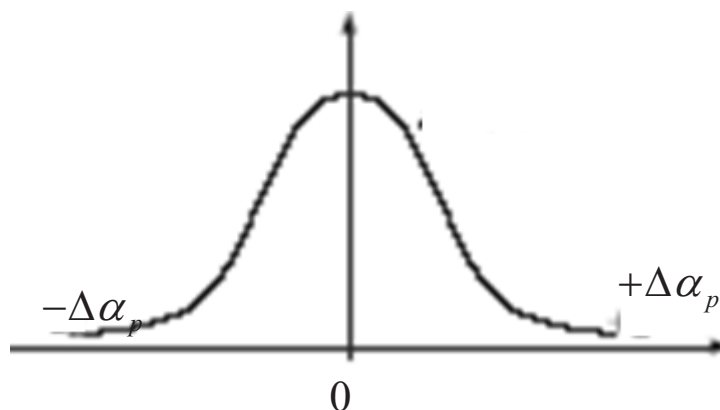
Détermination de l'erreur sur ε_T

$$\varepsilon_T = L_0 (T_e - T_0) (\alpha_p - \alpha_e) = L_0 \Delta T_e (\alpha_p - \alpha_e)$$

(a) Erreur systématique due à la méconnaissance de α_p

Au sein du matériau de la pièce le coefficient de dilatation présente une dispersion. On suppose que la dispersion suit la loi normale centrée.

$$\alpha_{pièce} = \alpha_p \pm \Delta\alpha_p$$



Erreur systématique due à la méconnaissance de α_p

$$E_s^{\alpha_p} = L_0 (T_e - T_0) \frac{\Delta\alpha_p}{3} \implies E_s^{\alpha_p} = L_0 \Delta T_e \frac{\Delta\alpha_p}{3}$$

(b) Erreur systématique due à la méconnaissance de α_e

$$E_s^{\alpha_e} = L_0 \Delta T_e \sigma$$

$$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{\sqrt{3}} \quad \text{Loi Uniforme}$$

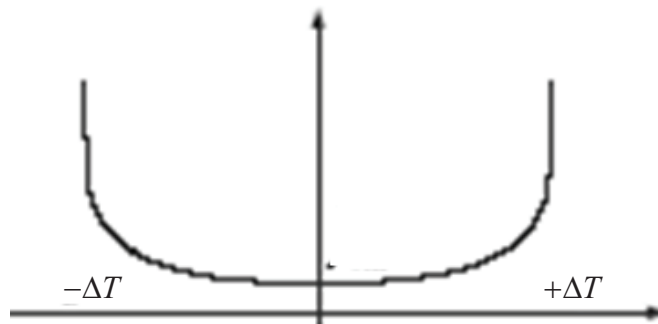
$$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{\sqrt{2}} \quad \text{Loi Arc sin}$$

Avec

$$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{3} \quad \text{Loi Normale}$$

(c) Erreur systématique due à ΔT

Dans un locale réglé à $\pm\Delta T$; Et si on suppose que la distribution de l'erreur sur le paramètre température suit une loi Arcsin centrée.



$$E_s^{\Delta T} = L_0 (\alpha_p - \alpha_e) \frac{\Delta T}{\sqrt{2}}$$

(d) Erreur systématique due à δT

L'écart entre la température de la pièce T_p et la température de l'étalon $T_e = 0 \pm \delta T$

$$E_s^{\delta T} = L_0 \alpha_p \sigma$$

$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{\sqrt{3}}$ Loi Uniforme

$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{\sqrt{2}}$ Loi Arc sin

$\sigma = \frac{\Delta\alpha_e}{3}$ Loi Normale

L'erreur Systématique Totale :

$$E_s^{TOTALE} = E_s^{R\acute{e}s} + E_s^{Etalon} + E_s^{\alpha_p} + E_s^{\alpha_e} + E_s^{\Delta T} + E_s^{\delta T}$$

Moyenne $\bar{X} = 0$; Etendue = $2a$

Lois	Distribution (étendue $d = 2a$)	Variance	Ecart-type
Normale ($a = 3\sigma \Rightarrow 99,73\%$)		$\frac{d^2}{36} = \frac{a^2}{9}$	$\frac{d}{6} = \frac{a}{3}$
Triangle isocèle		$\frac{d^2}{24} = \frac{a^2}{6}$	$\frac{d}{\sqrt{24}} = \frac{a}{\sqrt{6}}$
Uniforme		$\frac{d^2}{12} = \frac{a^2}{3}$	$\frac{d}{2\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Dérivée d'arc sinus		$\frac{d^2}{8} = \frac{a^2}{2}$	$\frac{d}{2\sqrt{2}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$
Triangle Rectangle		$\frac{d^2}{18} = \frac{a^2}{4,5}$	$\frac{d}{3\sqrt{2}} = \frac{a}{\sqrt{4,5}}$

CHAPITRE IV : Dimension et tolérances géométriques

RAPPELS

Sans indication contraire, les spécifications sont exprimés sur le principe de l'indépendance. Il n'y a pas de relation entre les spécifications.

1.1 Quelques définitions

Élément géométrique d'une pièce : c'est un point, une ligne ou une surface

Élément géométrique nominal : élément théorique exact défini par un dessin technique

Élément géométrique tolérancé : c'est l'élément géométrique d'une pièce sur lequel s'applique la spécification.

Élément géométrique de référence : c'est un élément géométrique d'une pièce pris comme référence.

Élément géométrique de référence simulé : surface réelle en contact avec l'élément de référence et suffisamment précise pour l'utiliser comme référence spécifiée.

Référence spécifiée : Élément géométrique parfait (point, droite ou plan) associé à l'élément de référence par un critère

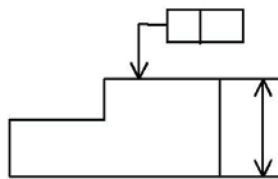
Élément géométrique extrait : c'est la représentation de l'élément réel

Élément géométrique dérivé : c'est le centre, l'axe ou le plan médian d'un élément extrait

Élément géométrique associé : c'est l'élément de forme théorique associé à l'élément extrait

1.2 Rappel sur l'écriture et interprétation de cote

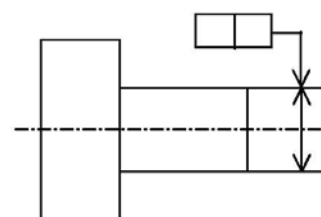
1.2.1 Cotation d'un élément réel



La ligne de repère n'est pas alignée avec la ligne de cote.

☞ La tolérance s'applique à l'élément lui-même

1.2.2 Cotation d'un élément dérivé



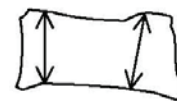
La ligne de repère est dans l'alignement de la ligne de cote.

☞ La tolérance s'applique à l'axe (ou au plan médian)

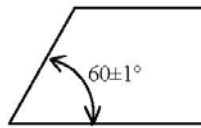
1.2.3 Cotation linéaire



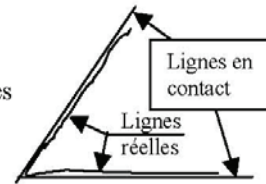
La cote limite uniquement les dimensions locales. Ce n'est pas la distance entre les deux plans



1.2.4 Cotation angulaire

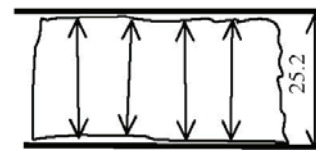
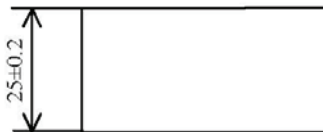


La cote limite uniquement les éléments linéaires des surfaces. Cette spécification angulaire ne définit pas la position relative des deux plans.



1.2.5 Cotation avec exigence de l'ENVELOPPE (Exception au principe d'indépendance)

L'exigence d'enveloppe : - Implique que l'élément réel ne doit pas dépasser une forme parfaite à la dimension maxi matière et que chaque dimension locale doit être supérieure à la valeur mini.



- Donne une relation entre la géométrie de la pièce et la spécification dimensionnelle

L'exigence d'enveloppe ne peut s'appliquer qu'à un cylindre ou à deux plans parallèles en vis à vis

1.3 Rappel sur l'écriture et l'interprétation de référence spécifiée

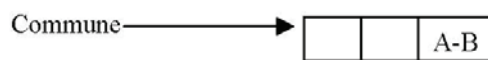
Les éléments de référence sont désignés par triangle noirci ou non

Remarque : La règle de représentation pour désigner la surface ou le plan médian est la même que pour les cotes

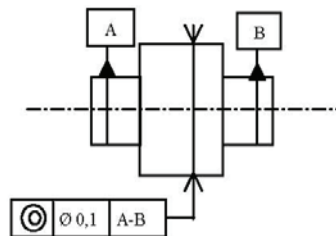
Il existe plusieurs types de références :



Un élément de référence pour une référence spécifiée



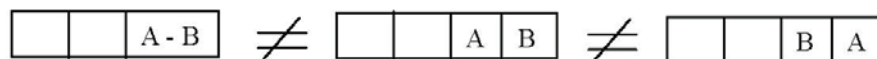
2 éléments de référence pour une référence spécifiée



La référence est l'axe défini par la droite passant par le centre de chacune des sections définies par A et B.



B est une référence secondaire en position par rapport à la référence primaire A



Les tolérances géométriques

Tolérances de forme



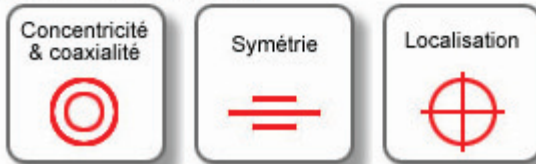
Tolérances d'orientation



Tolérances dimensionnelles



Tolérances de position



Tolérances de battement

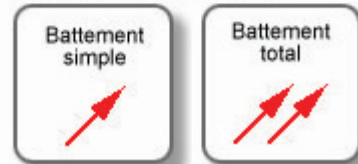
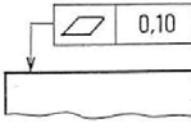
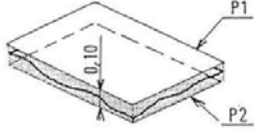
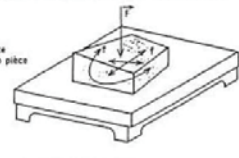

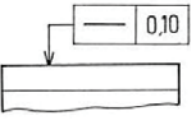
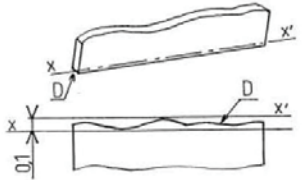
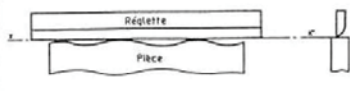
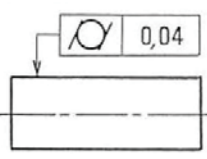
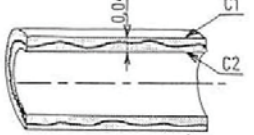
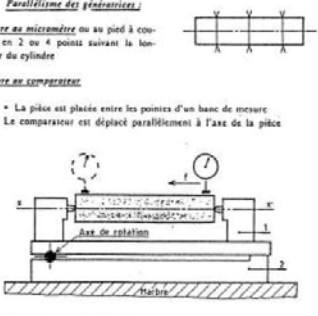
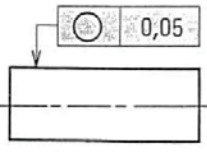
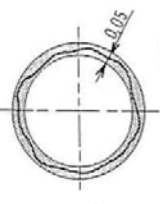
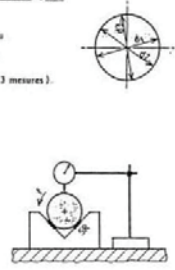


TABLEAU DES CARACTERISTIQUES A TOLERANCER

		Symboles	
Pour éléments isolés	Tolérances de FORME	Planéité d'une surface	
		Rectitude d'un axe – d'une ligne	
		Cylindricité d'un cylindre	
		Circularité d'un cylindre – d'un cône	
		Forme d'une surface quelconque	
Pour éléments associés	Tolérances d'ORIENTATION	Inclinaison	
		Perpendicularité	
		Parallélisme	
	Tolérances de POSITION	Localisation d'un élément	
		Coaxialité ou concentricité	
		Symétrie	
	BATTLEMENT	Battement simple	
Battement total			

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>PLANÉITÉ d'une surface</p> 	 <p>La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles, espacés de 0,10 mm.</p>	<p>Contrôle au marbre : On enduit le marbre d'une mince couche de produit coloré gras sur lequel on pose et on frotte doucement le plan à contrôler.</p> <p>F : effort sur la pièce f : déplacements de la pièce</p>  <p>Contrôle par faisceau de droites à la règlette : Le contrôle s'effectue par positions successives de la règlette</p> 
<p>RECTITUDE d'une droite</p> 	<p>La droite réelle doit être comprise entre deux droites théoriques parallèles distantes de 0,1 mm</p> 	<p>Contrôle sans mesure : L'opérateur évalue à l'œil la valeur des défauts</p> 

PLANETTE et RECTITUDE

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>CYLINDRICITÉ d'un cylindre</p> 	 <p>La surface considérée doit être comprise entre les cylindres C1 et C2 coaxiaux dont la différence des rayons est 0,04 mm.</p>	<p>Parallélisme des génératrices :</p> <ul style="list-style-type: none"> - mesure au micromètre ou au pied à coulisse en 2 ou 4 points suivant la longueur du cylindre - mesure au comparateur <p>La pièce est placée entre les points d'un banc de mesure. Le comparateur est déplacé parallèlement à l'axe de la pièce.</p> 
<p>CIRCULARITÉ d'un cylindre</p> 	<p>Tous les points du pourtour de chaque section droite doivent être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,05 mm.</p> 	<p>Les défauts de circularité peuvent être relevés par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - mesure directe au micromètre ou au pied à coulisse des diamètres d'une même section droite (2 ou 3 mesures). - relevé des écarts de parallèles <p>la pièce est posée dans un V, la mesure est réalisée par un comparateur à touche plane.</p> 

CYLINDRICITE et CIRCULARITE

INCLINAISON et PERPENDICULARITE

PARALLÉLISME et LOCALISATION

Page 160

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>INCLINAISON de 2 surfaces</p>	<p>La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2 parallèles, espacés de 0,1 mm et inclinés de 30° par rapport au plan de référence (A).</p>	<p>Le contrôle consiste à vérifier le parallélisme entre le plan B et le plan du marbre.</p>
<p>PERPENDICULARITÉ de 2 surfaces planes</p>	<p>La surface considérée doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles, espacés de 0,10 mm et perpendiculaires au plan de référence (A).</p>	<p>Solution 1 ⊙ Etalonnage du comparateur au cylindre étalon.</p> <p>⊙ Mesure de l'écart pour différentes positions de la pièce (T).</p> <p>Solution 2 Elle est plus pratique mais nécessite un support de comparateur spécial.</p>

Page 161

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>PARALLÉLISME de 2 surfaces</p>	<p>La surface A étant prise comme plan de référence, l'autre surface doit être comprise entre les plans P1 et P2, parallèles à A et espacés de 0,06 mm.</p>	<p>En prenant A comme S.R., les surfaces sont déclarées parallèles si l'écart maxi enregistré $e \leq 0,06$.</p>
<p>LOCALISATION d'un élément</p>	<p>L'axe du trou doit être situé à l'intérieur d'un prisme de côté $r = 0,2$ mm dont les plans médians sont situés à 15 et 22 mm des surfaces de référence de définition du trou.</p>	<p>Le problème consiste à relever la dimension entre une génératrice et un plan.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲ Lecture directe au pied à coulisse et au micromètre à touche fixe cylindrique ▲ Mesure indirecte <p>Au comparateur à palpeur orientable</p> <p>$X = h + r$</p>

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>COAXIALITÉ de 2 cylindres</p>	<p>L'axe du cylindre $\varnothing 20 f 8$ doit être compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0,1$ coaxiale à l'axe du cylindre A.</p>	<p>Contrôle sur V à 90°</p>
<p>SYMÉTRIE d'un tenon</p>	<p>Le plan médian du tenon 16 f10 doit être compris entre deux plans parallèles distants de $t = 0,4$ et disposés symétriquement par rapport au plan médian de référence A.</p>	<p>a) Pièce en appui sur la face \textcircled{D} réglage du comparateur au zéro. b) Pièce en appui sur la face \textcircled{Q}, relever l'écart t. Pour que la pièce soit acceptable il faut $t \leq t_0$.</p> <p>Mesure directe ou comparateur</p>

COAXIALITE et SYMETRIE

	EXEMPLE DE SPÉCIFICATION	SIGNIFICATION	COMMENTAIRE	MOD★LE pour Contrôle sur MMT
TOLÉRANCE DE POSITION	<p>LOCALISATION</p>	<p>Éléments de référence A, B et C</p>	<p>L'élément extrait dérivé (axe réel de la surface cylindrique) doit être compris dans un cylindre de diamètre 0,2 mm perpendiculaire à la référence spécifiée A et positionné par rapport aux références spécifiées B et C. (Les références spécifiées sont les plans associés aux éléments de référence A, B et C)</p>	
	<p>COAXIALITÉ, CONCENTRICITÉ</p>	<p>Élément extrait dérivé</p>	<p>L'élément extrait dérivé (axe réel de la surface cylindrique) doit être compris dans un cylindre de diamètre 0,1 mm centré sur la référence spécifiée. (La référence spécifiée est la droite associée A-B passant par les centres des cercles associés aux éléments de référence A et B)</p>	
	<p>SYMÉTRIE</p>	<p>Zone de tolérance</p>	<p>L'élément extrait dérivé (surface réelle dérivée) doit être compris dans un volume limité par deux plans parallèles distants de 0,2 mm centrés sur la référence spécifiée. (La référence spécifiée est le plan associé dérivé aux éléments de référence A.)</p>	

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>BATTEMENT SIMPLE RADIAL</p> <p>0,06 A</p>	<p>Axe de référence (A)</p> <p>0,06</p> <p>La pièce étant guidée en rotation autour de l'axe de référence (A), dans chaque section droite de la surface cylindrique tolérancée, le battement ne doit pas dépasser 0,06 mm.</p>	<p>Axe de référence</p> <p>P1 P2</p> <p>Le contrôle est réalisé sur un banc de mesure (fig.) ou sur un marbre.</p>
<p>BATTEMENT SIMPLE AXIAL</p> <p>0,04 C</p>	<p>Axe de référence</p> <p>0,04</p> <p>La pièce étant guidée en rotation autour de l'axe de référence (C), pour chaque cercle pris sur la surface latérale, le battement ne doit pas dépasser 0,04 mm.</p>	<p>Butée</p> <p>FR</p> <p>Marbre</p> <p>Le contrôle est réalisé sur un marbre, la pièce est en appui sur 2 vés à portée réduite (fig.) ou sur un banc de mesure</p>

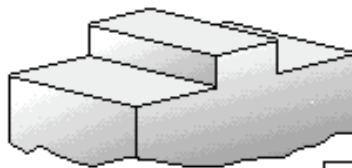
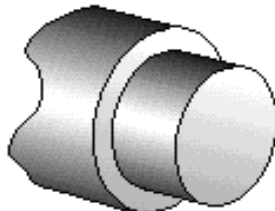
BATTEMENT SIMPLE RADIAL et AXIAL

Spécifications à contrôler	Signification	Solutions techniques proposées
<p>BATTEMENT TOTAL RADIAL</p> <p>0,2 A</p>	<p>Axe XX' de la surface de référence</p> <p>Surface contrôlée</p> <p>Surface de référence</p> <p>Cylindres limites coaxiaux avec XX'</p> <p>La zone de tolérance est limitée par deux surfaces cylindriques distantes de $t = 0,2$ ayant pour axe commun l'axe de la surface de référence A (xx').</p>	<p>B-B</p> <p>A-A</p> <p>Le contrôle est réalisé :</p> <ul style="list-style-type: none"> sur un marbre, la pièce est posée sur un support à 90° (fig. 1), sur un banc de mesure.
<p>BATTEMENT TOTAL AXIAL</p> <p>0,2 A</p>	<p>Axe XX' de la surface de référence A</p> <p>Surface contrôlée</p> <p>Surface de référence</p> <p>Plans limites</p> <p>La zone de tolérance est limitée par deux plans distants de $t = 0,2$ perpendiculaires à l'axe de référence.</p>	<p>B-B</p> <p>A-A</p> <p>Le contrôle est réalisé :</p> <ul style="list-style-type: none"> sur un marbre, la pièce est posée sur un rapport à 90° (fig.), sur un banc de mesure.

BATTEMENT TOTAL RADIAL et AXIAL

S5 La Qualité - Le Contrôle

Démarche Qualité
✓ Bases de Métrologie
Contrôle de la Qualité



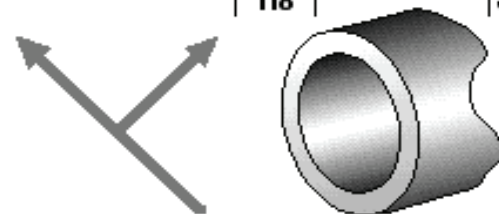
Éléments contenus
Éléments mâles
Arbres

Les écarts de tolérance sont exprimés en millièmes de millimètre (μ). Les éléments contenantants ont une position de tolérance fixe représentée par la lettre majuscule "H" les éléments contenus ont la position de leur tolérance représentée par une lettre minuscule "a...z". Pour tous les éléments, la qualité est représentée par un nombre (01 ... 13)

Exemples:
 50 H7 maxi = 50 + 0,030
 mini = 50 + 0,000
 50 h7 maxi = 50 + 0,000
 mini = 50 - 0,025
 tol Js/ js 13 ← 50
 maxi = 50 + 0,230
 mini = 50 - 0,230

Tolérances & Ajustements

		g6	h6	m6		f7	h7	js13
3 à 6	12 0	-4 -12	0 -8	12 4	18 0	-10 -22	0 -12	90 -90
6 à 10	15 0	-5 -14	0 -9	15 6	22 0	-13 -28	0 -15	110 -110
10 à 14	18 0	-6 -17	0 -11	18 7	27 0	-16 -34	0 -18	135 -135
14 à 18	18 0	-6 -17	0 -11	18 7	27 0	-16 -34	0 -18	135 -135
18 à 24	21 0	-7 -20	0 -13	21 8	33 0	-20 -41	0 -21	165 -165
24 à 30	21 0	-7 -20	0 -13	21 8	33 0	-20 -41	0 -21	165 -165
30 à 40	25 0	-9 -25	0 -16	25 9	39 0	-25 -50	0 -25	195 -195
40 à 50	25 0	-9 -25	0 -16	25 9	39 0	-25 -50	0 -25	195 -195
50 à 65	30 0	-10 -29	0 -19	30 11	46 0	-30 -60	0 -30	230 -230
65 à 80	30 0	-10 -29	0 -19	30 11	46 0	-30 -60	0 -30	230 -230
80 à 100	35 0	-12 -34	0 -22	35 13	54 0	-36 -71	0 -35	270 -270
100 à 120	35 0	-12 -34	0 -22	35 13	54 0	-36 -71	0 -35	270 -270
	H7				H8			Js13



Éléments contenantants
Éléments femelles
Alésages
Rainures...