



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université des Frères Mentouri Constantine 1
INSTITUT DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES APPLIQUEES

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة 1
معهد العلوم والتقنيات التطبيقية

Métrologie 02

Mr. Fateh MAKHLOUFI
Institut des Sciences et des Techniques Appliquées
Université des Frères Mentouri Constantine 1



makhloufi.fateh@gmail.com

Contenu

Chapitre 1

Les tolérances géométriques (forme, position, ...)

Chapitre 2

L'état de surface (Rugosité de Surface)

Chapitre 3

La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Chapitre 1 :

Contenu

Introduction

Inscription des tolérances

Indications d'un élément

Tolérances de forme

- Planéité
- Rectitude
- Circularité
- Cylindricité

Tolérances de position

- Localisation
- Concentricité
- Coaxialité
- Symétrie

Tolérances d'orientation

- Parallélismes
- Perpendicularités
- Inclinaison

Tolérances de battement

- Battement simple
- Battement total

Tolérance géométrique

I. Objectifs spécifiques

- Décoder des tolérances géométriques de forme, d'orientation et de position ... avec la norme.
- Mettre en place des tolérances géométriques sur un dessin de définition d'une pièce.

II. Introduction :

Une pièce est manufacturée pour remplir des fonctions. Certaines fonctions ne sont remplies que si la pièce a une forme bien déterminée. La **Spécification Géométrique de Produit (GPS)** consiste à définir, au travers d'un dessin de définition, la géométrie, les dimensions, les caractéristiques de surface d'une pièce qui assurent un fonctionnement optimal. Dans la cotation fonctionnelle, on distingue :

- **Les tolérances dimensionnelles**, qui détermine les dimensions (longueur, largeur, rayon ou diamètre, ...) ainsi que le jeu permettant le montage, le démontage et les mouvements.
- **Les tolérances géométriques**, étudiées ici.

III. Rappel

Les tolérances dimensionnelles :

Une cote imposée sera plus facile à réaliser si elle peut varier entre deux valeurs limites : une cote **maximale** et une cote **minimale**. La différence entre les deux s'appelle la **tolérance**, ou intervalle de tolérance.

Tolérance : Spécification qui définit la variation admissible de dimension (tolérance dimensionnelle) ou de géométrie (tolérance géométrique)

La cote effectivement réalisée soit comprise entre deux valeurs limites, compatibles avec le fonctionnement correct de la pièce : Une cote Maximale et une cote minimale.

IV. Tolérance géométrique

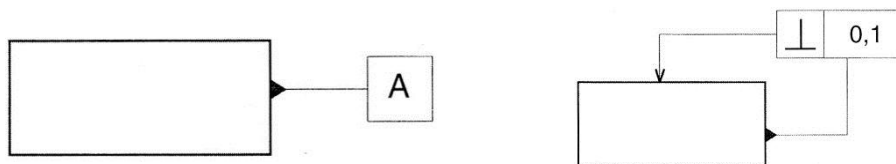
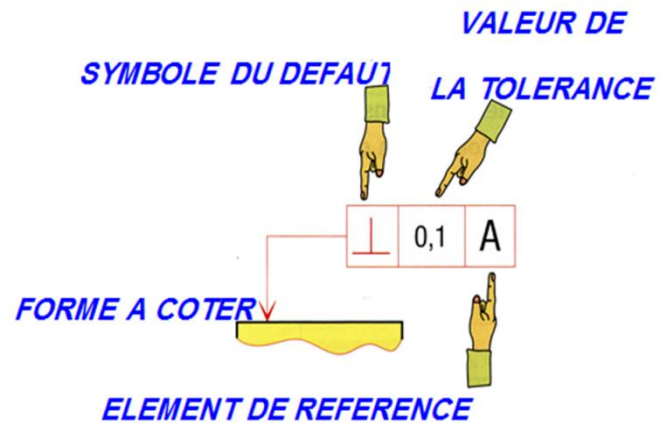
Les tolérances dimensionnelles usuelles (ajustements ...) ne suffisent pas pour définir avec exactitude la forme géométrique d'un objet. Les tolérances géométriques permettent de corriger ces insuffisances et précisent les variations permises. Les spécifications géométriques sont classées en catégories :

- Tolérances de forme
- Tolérances de position
- Tolérances d'orientation
- Tolérances de battement
- Tolérances de ligne et de surface quelconque

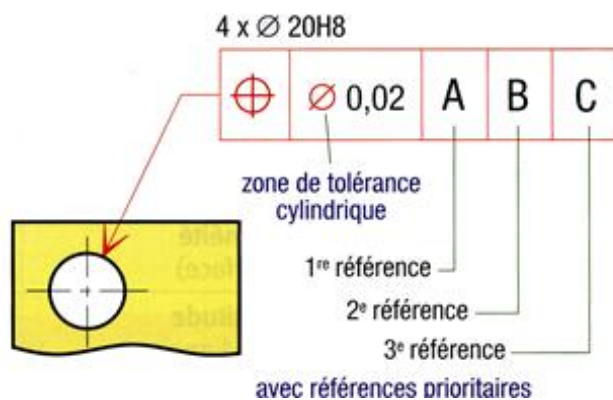
V. Inscription des tolérances

La tolérance géométrique est une tolérance qui concerne l'aspect géométrique d'une pièce. Ce n'est pas une tolérance appliquée directement à une dimension.

- ✚ La forme à coter est repérée par une flèche.
- ✚ Les tolérances s'inscrivent dans un cadre pouvant avoir 2 ou 3 cases.
- ✚ Dans ces cases sont inscrites dans l'ordre:
 - Le symbole du défaut à coter (planéité, rectitude, ...).
 - La valeur de la tolérance en mm.
 - La lettre majuscule repérant l'élément de référence (si nécessaire).
- ✚ L'élément de référence se repère par une lettre majuscule inscrite dans un carré qui est relié à un triangle noirci (ou non) dont la base touche l'élément de référence (figure ci-dessous).
- ✚ Lorsque l'élément de référence est proche du cadre de la tolérance, il est possible de les relier directement.

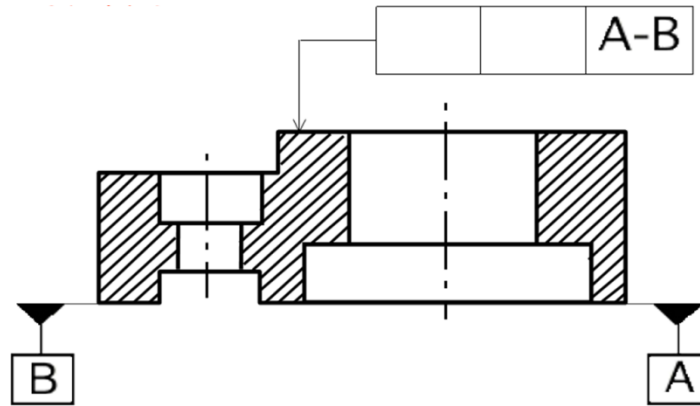


- ✚ Les tolérances s'inscrivent dans un cadre pouvant avoir 2 ou 3 cases (parfois plus). Dans ces cases sont inscrites dans l'ordre:



- ✚ Référence spécifiée commune: Une référence spécifiée commune est obtenue par l'association de l'union de plusieurs références simulées, à l'union de plusieurs éléments de références.

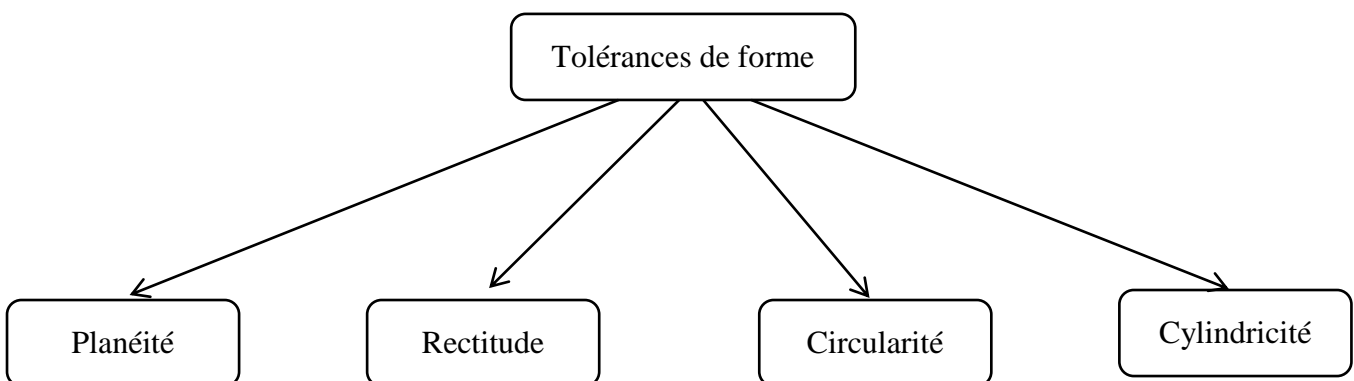




VI. Indications d'un élément


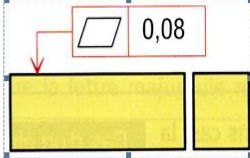
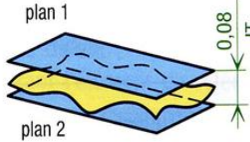
ELEMENTS INDIQUES		
LIGNES OU SURFACES	AXE OU PLAN MEDIAN DE L'ELEMENT COTE	AXE OU PLAN MEDIAN DE PLUSIEURS ELEMENTS
	<p><i>Axe du grand cylindre</i></p>	<p><i>Axe de la pièce</i></p>
<p><i>Grand cylindre</i></p>	<p><i>Axe du petit cylindre</i></p>	
		<p><i>Plan médian de la pièce</i></p>

VII. Tolérances de forme




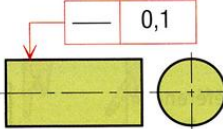
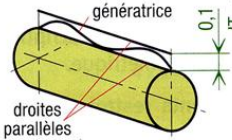
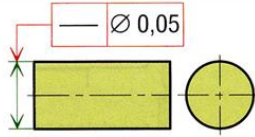
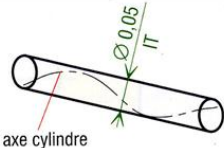
Planéité :

La zone de tolérance est limitée par deux plans parallèles distants de 0,08 dont l'étendue est celle de l'élément spécifié. Tous les points de la surface spécifiée doivent se trouver dans la zone de tolérance.

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>PLANEITE</p> 		 <p>La surface repérée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,08 mm.</p>


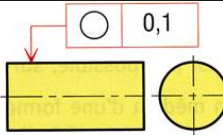
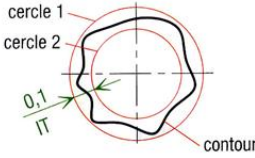
Rectitude :

Une ligne quelconque de la surface supérieure, parallèle au plan de projection dans lequel l'indication est donnée, doit être contenue entre deux droites parallèles distantes de 0,2 . Leur longueur est celle de l'élément spécifié.

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>RECTITUDE</p> 		 <p>Chaque génératrice du cylindre doit rester entre 2 droites parallèles, distantes de 0,1 mm parallèles ou non à l'axe.</p>
		 <p>L'axe du cylindre doit être contenu dans une zone cylindrique de 0,05 mm de diamètre.</p>


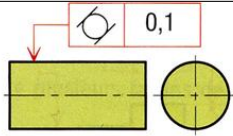
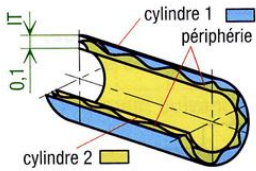
Circularité :

Le pourtour de chaque section droite du cylindre doit être compris entre deux cercles concentriques distants de 0,1

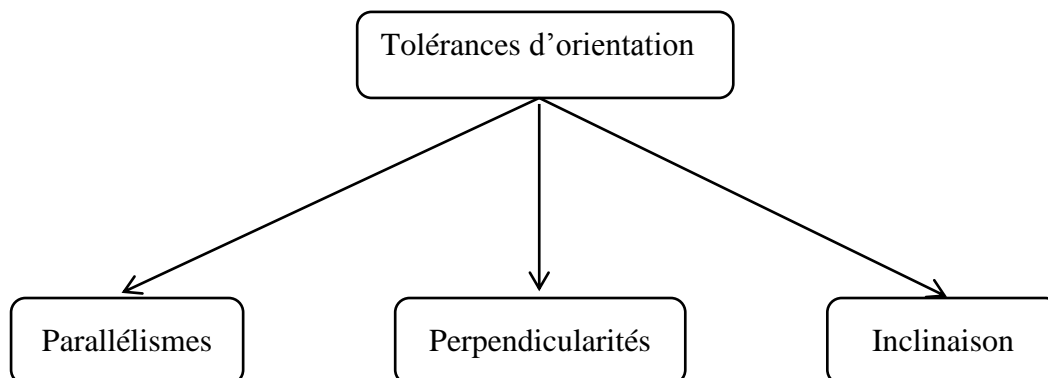
SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>CIRCULARITE</p> 		 <p>Le contour de chaque section perpendiculaire à l'axe doit rester entre deux cercles concentriques distants de 0,1 mm, centrés ou non sur l'axe du cylindre.</p>

Cylindricité :

La zone de tolérance est limitée par deux cylindres coaxiaux distants de 0,1 dont la longueur est celle de l'élément spécifié. Tous les points de la surface spécifiée doivent se trouver dans la zone de tolérance.


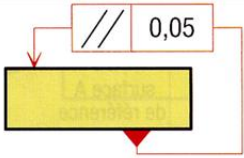
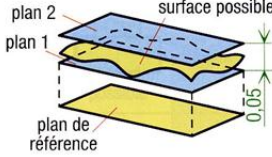
SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>CYLINDRICITE</p> 		 <p>La périphérie du cylindre doit être contenue entre deux cylindres coaxiaux distants de 0,1 mm (englobe la rectitude et la circularité).</p>

VIII. Tolérances d'orientation




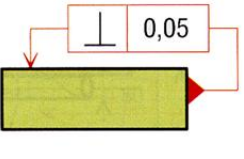
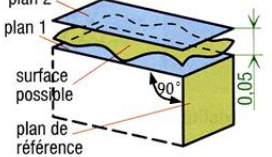
Parallélismes :

L'axe du trou doit se trouver dans la zone de tolérance limitée par deux plans parallèles distants de 0,05 dont l'étendue est celle de l'élément spécifié, et parallèles au plan de référence.

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>PARALLELISME</p> 		 <p>La surface supérieure doit rester entre deux plans distants de 0,05 (plans 1 et 2) parallèles au plan de référence inférieur.</p>


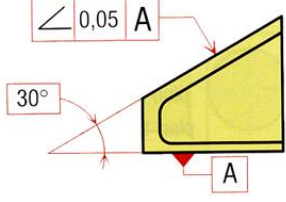
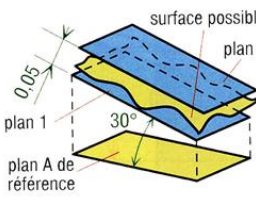
Perpendicularités :

Tous les points de la surface spécifiée doivent se trouver dans la zone de tolérance limitée par deux plans parallèles distants de 0,05 dont les étendues sont celles de l'élément spécifié et **perpendiculaires** au plan de référence A.

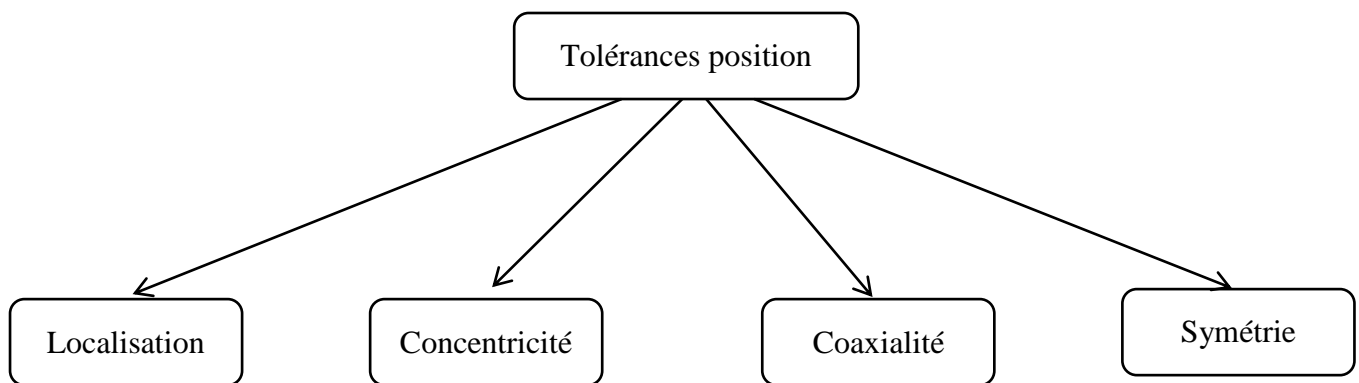
SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>PERPENDICULARITE</p> 		 <p>La surface supérieure doit rester entre deux plans distants de 0,05 perpendiculaires au plan de référence repéré.</p>

Inclinaison :

Tous les points de la surface spécifiée doivent se trouver dans la zone de tolérance limitée par deux plans parallèles distants de 0,1 dont les étendues sont celles de l'élément spécifié et **inclinés** de 30° par rapport au plan de référence A.


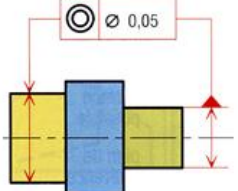
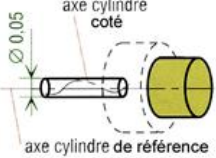
SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>INCLINAISON</p> 		 <p>La surface repérée doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,05 et inclinés de 30° par rapport au plan de référence A.</p>

IX. Tolérances de position




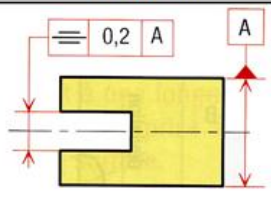
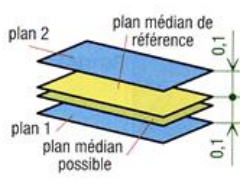
Co-axialité :

L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans un cylindre de diamètre 0,05 coaxial à l'axe de référence dont la longueur est celle de l'élément spécifié.


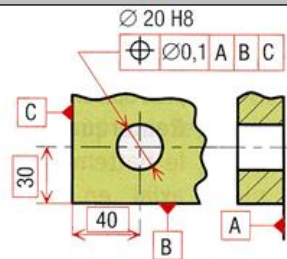
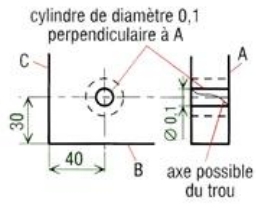
SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>COAXIALITE</p> 		 <p>L'axe du cylindre de gauche (coté) doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,05 dont l'axe est celui du cylindre droit (de référence)</p>

Symétrie :

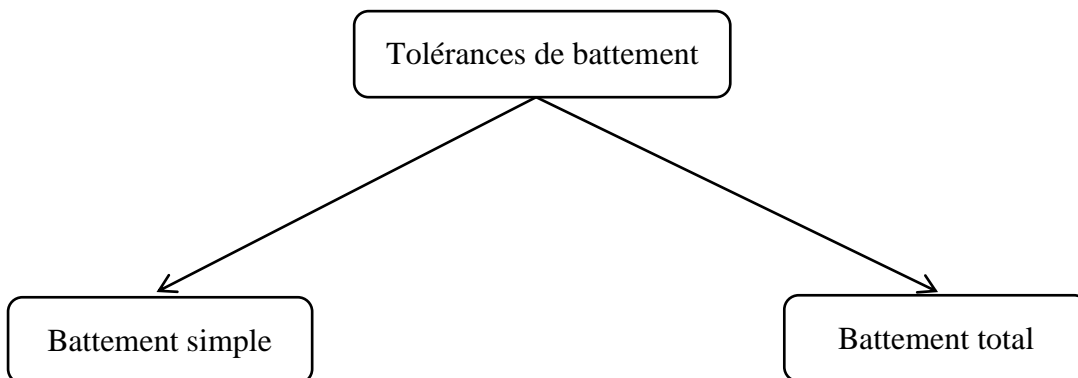
Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,2 dont l'étendue est celle de l'élément spécifié et disposés symétriquement par rapport au plan médian de référence.

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>SYMETRIE</p> 		 <p>Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans (1 et 2) parallèles distants de 0,2 et disposés symétriquement par rapport au plan médian de référence A</p>

Localisation :

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
<p>LOCALISATION</p> 		 <p>L'axe du trou de 20 doit être situé dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 dont l'axe est perpendiculaire à A et positionnés par les cotes théoriques encadrées de 30 et 40.</p>

X. Tolérances de battement



Battement simple :

Battement simple axial


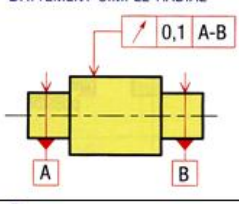
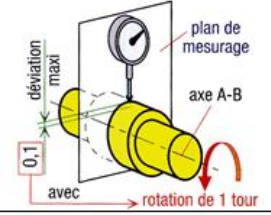
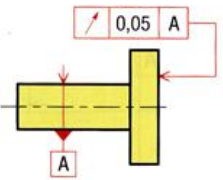
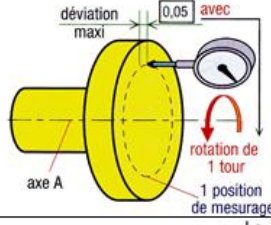
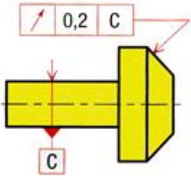
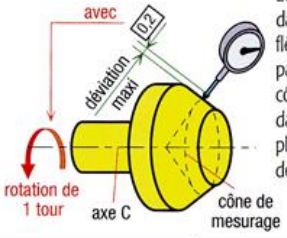
La zone de tolérance est limitée pour chaque position radiale, par deux circonférences distantes de **t** situées sur le cylindre de mesure dont l'axe coïncide avec l'axe de référence.

Battement simple radial


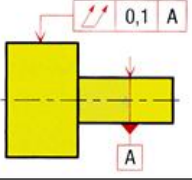
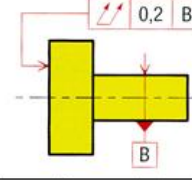
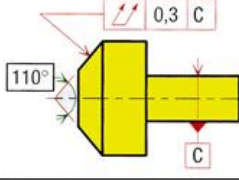
La zone de tolérance est limitée dans chaque plan de mesure perpendiculaire à l'axe par deux cercles concentriques distants de **t** dont le centre coïncide avec l'axe de référence.

Battement simple oblique

La zone de tolérance est limitée sur chaque cône de mesure par deux circonférences distantes de **t**. Chaque cône de mesure a ses génératrices dans la direction spécifiée et son axe coïncide avec l'axe de référence.

SYMBOLE	EXEMPLE	SIGNIFICATION
BATTEMENT SIMPLE 	BATTEMENT SIMPLE RADIAL 	 <p>Le battement radial ne doit pas dépasser 0,1 dans chaque plan de mesurage pendant une révolution complète de la pièce autour de l'axe de référence A-B.</p>
	BATTEMENT SIMPLE AXIAL 	 <p>Le battement axial ne doit pas dépasser 0,05 dans chaque position de mesurage pendant une révolution complète de la pièce autour de l'axe de référence A.</p>
	BATTEMENT SIMPLE OBLIQUE 	 <p>Le battement oblique dans la direction de la flèche ne doit pas dépasser 0,2 dans chaque cône de mesurage pendant une révolution complète de la pièce autour de l'axe de référence C.</p>

Battement total :

BATTEMENT TOTAL 	BATTEMENT TOTAL RADIAL 	BATTEMENT TOTAL AXIAL 	BATTEMENT TOTAL OBLIQUE 
	<p>Le cylindre repéré doit rester entre deux cylindres coaxiaux, distants de 0,1 dont les axes coïncident avec l'axe de référence A (pour une rotation complète autour de cet axe).</p> <p>Remarque : comme le battement simple radial en déplaçant en plus l'appareil de mesure le long d'une génératrice du cylindre.</p>	<p>La surface repérée doit être comprise entre deux plans parallèles, distants de 0,2 et perpendiculaires à l'axe de référence B (pour une rotation complète autour de cet axe).</p> <p>Remarque : comme le battement simple axial en déplaçant en plus l'appareil de mesure le long d'un rayon.</p>	<p>La surface repérée doit être comprise entre deux cônes distants de 0,3, d'angle 110° et coaxiaux à l'axe de référence C (pour une rotation complète autour de cet axe).</p> <p>Remarque : comme le battement simple oblique en déplaçant en plus l'appareil de mesure le long d'une génératrice du cône.</p>

Chapitre 2 :

Contenu

Introduction

L'état de surface (Rugosité de Surface)

Mesure de l'état de surface

- Défauts macro géométriques
- Défauts micro géométriques

Principes techniques de la mesure

Inscription normalisée d'un état de surface

Indications ajoutées aux symboles

- Outils de comparaison visuelle
- Mesure par contact
- Mesure sans contact

L'état de surface

I. Introduction:

Les propriétés des solides et leur comportement dépendent, souvent, davantage des caractéristiques de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques. La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. Elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que l'aptitude aux frottements, la résistance à l'usure ou la corrosion, conduction thermique et électrique, résistance aux contraintes mécaniques, étanchéité statique ou dynamique, aspect, etc.

Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la surface idéale. Pour les décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

Connaître l'influence de l'état d'une surface sur le fonctionnement d'une pièce et son comportement dans le temps nécessite de pouvoir caractériser sa géométrie, macro, micro, voire même nanogéométrie dans certains cas.

II. État de surface et Rugosité

État de surface:

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées.

Rugosité:

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide. C'est aussi un paramètre d'un écoulement se produisant sur ce matériau.

Pour quoi mesurer l'état de surface ?

Tous les objets, et notamment les pièces constitutives des produits industriels, présentent des surfaces diverses avec pour chacune d'elles une fonction associée qui va de la simple limitation de la matière à la réalisation d'une étanchéité dynamique en passant par la tenue d'un revêtement ou la biocompatibilité pour une prothèse médicale par exemple.

La microgéométrie de la surface intervient souvent de façon déterminante dans son aptitude à satisfaire la fonction attendue.

Par exemple au niveau des interfaces entre les pièces d'un assemblage avec mouvement relatif, les divers phénomènes de contraintes et de frottements évoluent continuellement jusqu'à la perte de performance qui va entraîner la déficience du mécanisme.

La maîtrise de l'état de surface par le choix d'un ou plusieurs paramètres adaptés permettra de garantir la qualité du fonctionnement tout au long de la durée de vie du produit. Autrement dit :

- Répondre aux spécifications
- Déterminer des critères
- Ajuster nos procédés

Raisons des spécifications:

- Assurer une bonne adhésion
- Résistance à l'usure
- Assurer une lubrification adéquate
- Brillance et réflexion
- Garder contact entre 2 pièces
- Apparence esthétique
- Aérodynamisme
- Performances

Exemple

Par exemple, la figure 3.1 montre que l'étanchéité et l'usure du joint sont essentiellement fonction de l'état de surface de l'alésage du cylindre.

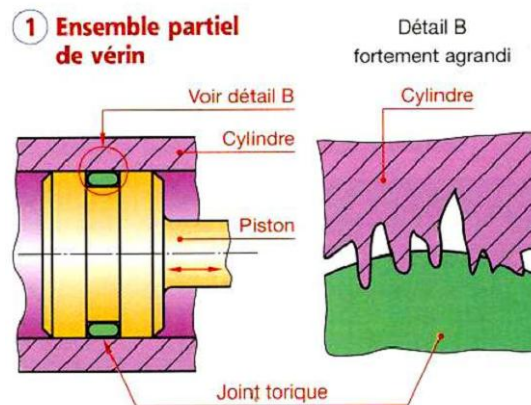


Figure 2.1 Ensemble partiel de vérin

Un joint torique est un joint en forme de tore (tube courbé refermé sur lui-même). Son utilisation peut être statique ou dynamique.

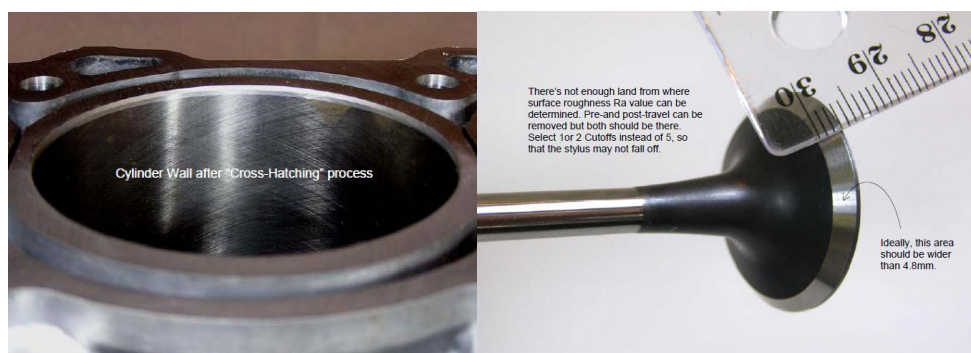


Figure 2.2 : Alésage et coussin.

III. Décomposition d'une surface mesurée

Une surface, quelque soit son procédé de fabrication, n'est pas une surface parfaitement lisse: selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériel, elle présente de nombreuses irrégularités, micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne" et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité.

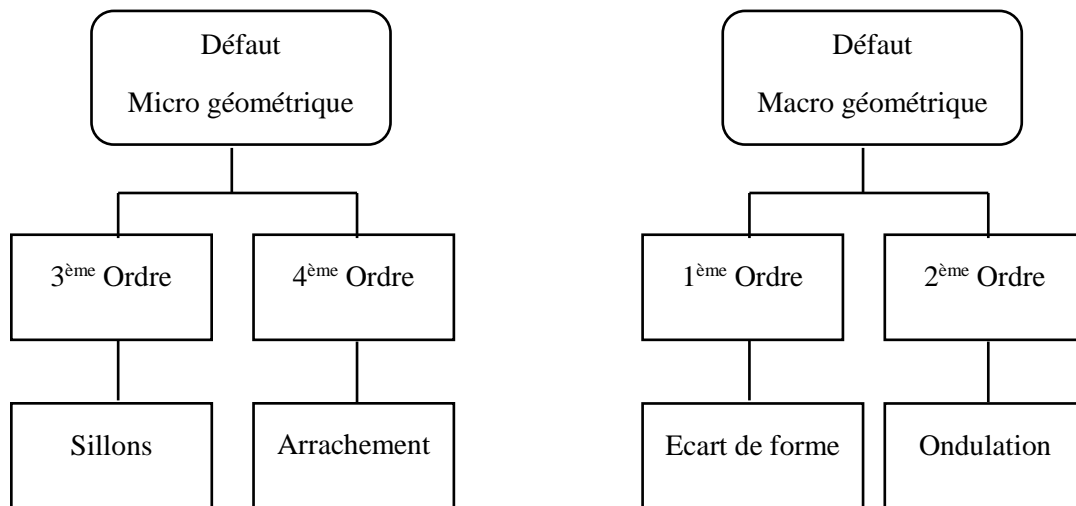


Figure 3.1 : Défauts Macro géométriques et Micro géométriques.

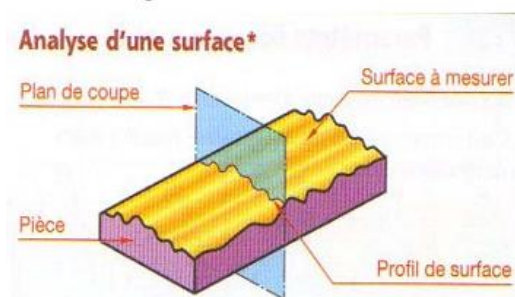
Défauts du premier ordre: (écarts de forme) :

Ce sont des défauts de forme. Par exemple, écart de rectitude, écart de circularité,...

Défauts du deuxième ordre: (ondulation) : c'est une ligne ondulée. Elle est caractérisée par une ligne enveloppe supérieure. La distance d'irrégularité entre deux sommets est comprise entre 0,5 et 2,5 mm environ.

Défauts du troisième et quatrième ordre (défauts micro géométriques) :

Ils caractérisent la rugosité de la surface.(3^{ème} ordre : stries et sillons ; La distance entre deux sillons est comprise entre 0,02 et 0,5 mm environ.4^{ème} ordre : arrachements, fentes...) La distance entre deux pics de ces irrégularités est inférieure ou égale à 20 μm



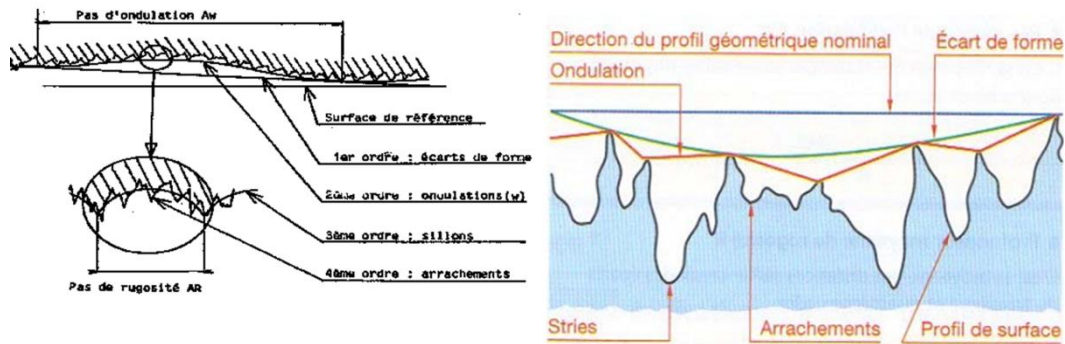


Figure 3.2 : Les défauts Macro géométriques et Micro géométriques.

IV. Principes techniques de la mesure

La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres. On peut citer notamment, parmi les plus utilisés:

Écart moyen arithmétique du profil R_a

R_a est égal à la moyenne arithmétique, calculée sur la longueur de base, de la valeur absolue de l'ordonnée z en chaque point du profil et l'axe OX .

$$R_a \cong \frac{|z_1| + \dots + |z_n|}{n}$$

Remarque : valeurs exprimées en μm

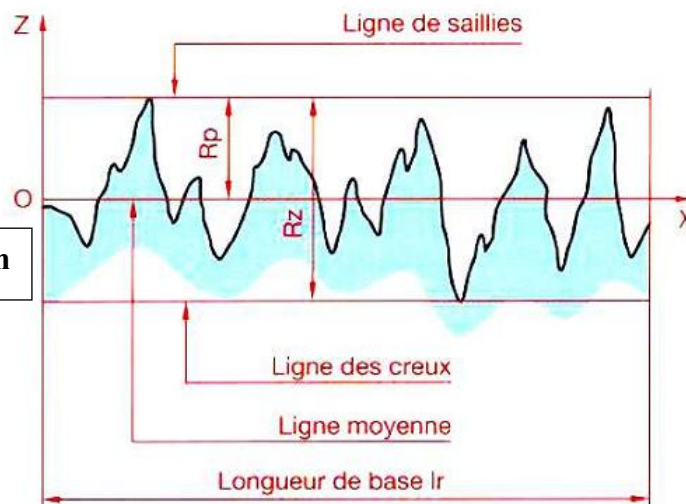


Figure 4.1 : Paramètre de mesure de rugosité R_a .

Hauteur maximale du profil R_z : C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

Hauteur maximale des saillies R_p : C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des moyennes.

Pic maximal R_p

Pic maximal observé sur la longueur analysée. Si l'on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne centrale de la surface à mesurer, le pic maximal, lu sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté $R_p = y_{\text{max}}$ (voir diagramme ci-dessous)

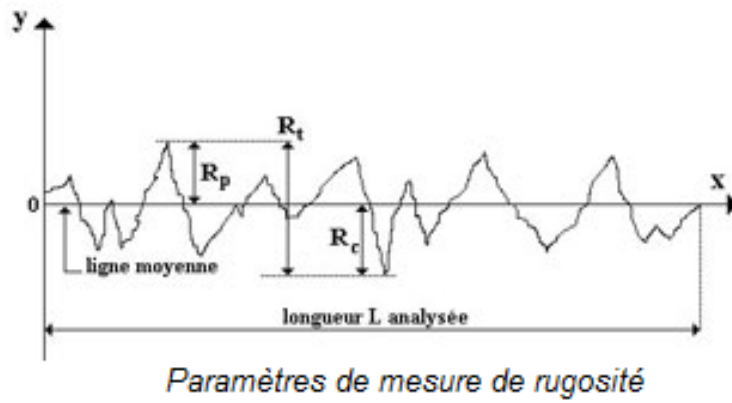


Figure 4.2 : Paramètre de mesure de rugosité R_p

Creux maximal R_c

Creux maximal observé sur la longueur analysée (voir diagramme ci-dessous). $R_c : R_c = |y_{\min}|$

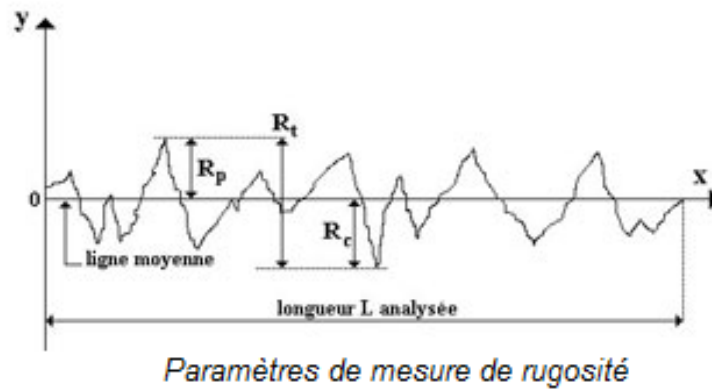


Figure 4.3 : Paramètre de mesure de rugosité R_c

Rugosité total R_t

Rugosité totale : Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_t = R_p + R_c$ (voir diagramme ci-dessous)

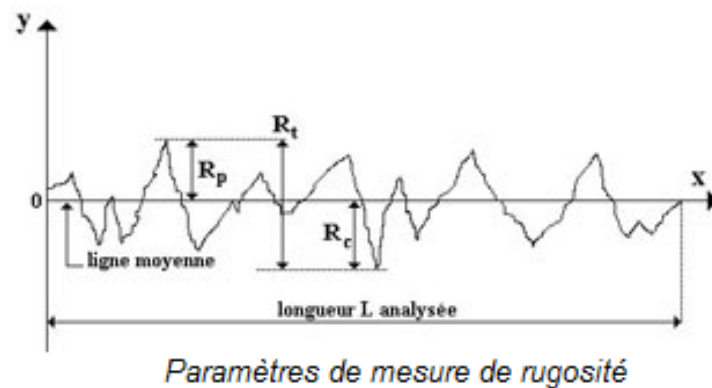
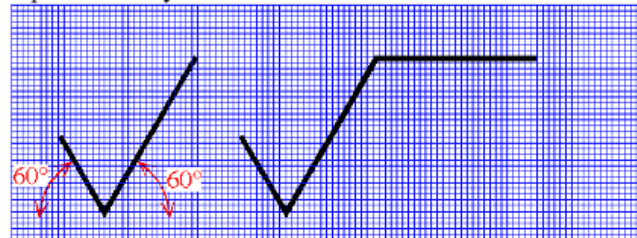
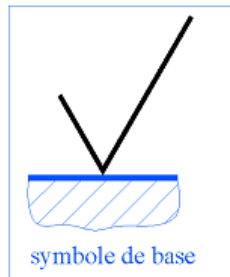


Figure 4.4 : Paramètre de mesure de rugosité R_t

V. Inscription normalisée d'un état de surface

Symbole de base

Le symbole de base est constitué de deux branches de longueurs inégales, inclinées de 60° environ, comme l'indique la figure.



Remarque : pris individuellement, ce symbole indique que l'état de la surface repérée est pris en considération, sans pour autant avoir d'exigence particulière concernant la rugosité.

Symbole utilisé lorsqu'un enlèvement de matière par usinage est exigé :

Si un enlèvement de matière par usinage est **exigé**, un trait doit être ajouté au symbole de base précédent.



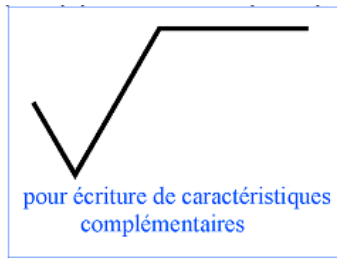
Symbole utilisé lorsqu'un enlèvement de matière par usinage est interdit

Lorsqu'un enlèvement de matière est **interdit**, un cercle doit être ajouté au symbole de base



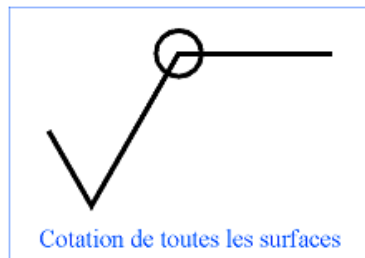
Symbole utilisé pour écrire des caractéristiques complémentaires

S'il est nécessaire de fournir des caractéristiques ou des valeurs concernant la surface, le symbole de base doit être complété par un trait horizontal supplémentaire destiné à recevoir les indications.



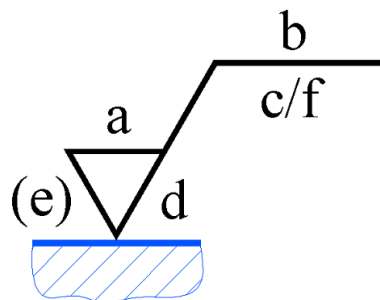
Symbole utilisé pour coter en même temps toutes les surfaces d'une même pièce

Si un même état de surface est exigé pour toutes les surfaces d'une même pièce, il suffit d'ajouter un cercle au symbole du paragraphe précédent.



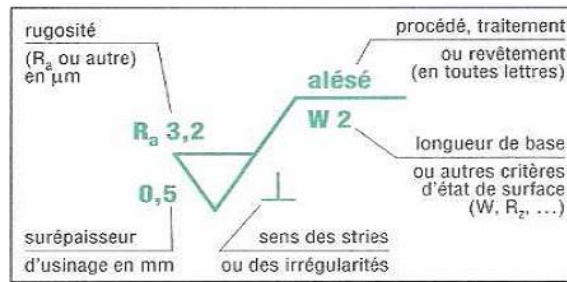
VI. Indications ajoutées aux symboles

Par rapport aux symboles du paragraphe précédent, la norme donne une position précise pour les différentes indications de surface (rugosité, ondulation, irrégularités...). Les principales dispositions sont données figure ci-dessous



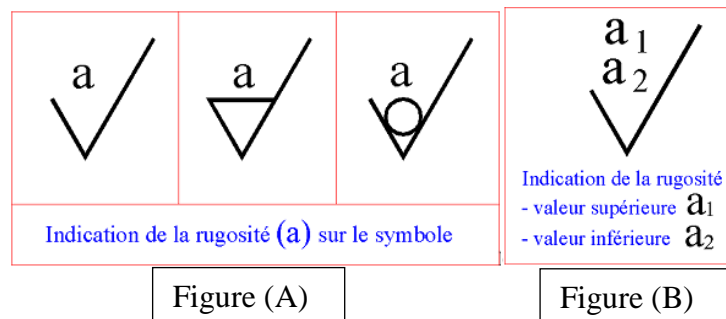
Emplacement	Indications à inscrire - Observations
a	Symbole du paramètre de rugosité retenu, généralement Ra (d'autres sont possibles), suivi de sa valeur en micromètres ou μm . Exemple: Ra 6,3.
b	Indication du procédé de fabrication, traitement, revêtement ou autre exigence de fabrication.
c	Hauteur d'ondulation en micromètres (μm) précédée du symbole du paramètre, ou longueur de base en mm.
d	Irrégularités de la surface.
e	Surépaisseur d'usinage.
f	Valeurs de rugosité autres que Ra, en micromètres (μm), précédées du symbole du paramètre retenu. Exemple: Rz 0,4

Exemples



VII. Indication de la rugosité

Pour chaque surface à coter, la valeur de la rugosité R_a , écart moyen arithmétique (ou autre paramètre retenu), doit être indiquée en haut de la partie gauche du vé (emplacement "a" figure (A)). Si en "a" une seule valeur est prescrite, cette valeur représente la limite supérieure du paramètre de rugosité retenu. Si une valeur supérieure (a_1) et une valeur inférieure (a_2) sont nécessaires à l'indication, celles-ci doivent occuper les positions de la figure (B), la limite supérieure (a_1) étant placée au-dessus de la limite inférieure (a_2).



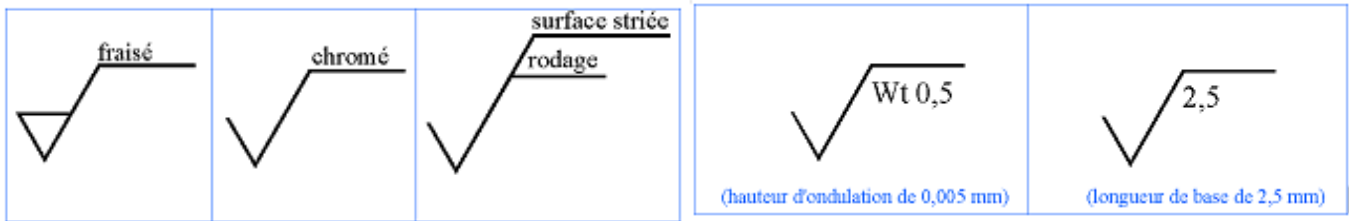
Remarque : même si l'emplacement "f" est également possible, utiliser en priorité l'emplacement "a" pour indiquer la valeur de la rugosité (R_a , R_z ...).

Exemples 'indications :

L'enlèvement de matière par usinage est :			Observations
facultatif	obligatoire	interdit	
			surface avec rugosité R_a maxi de $3,2 \mu\text{m}$
			surface avec rugosité R_a maxi de $6,3 \mu\text{m}$ et de R_a mini de $1,6 \mu\text{m}$
			surface avec rugosité autre que R_a Ici R_y maxi vaut $0,4 \mu\text{m}$
			surface avec rugosité autre que R_a . R_z maxi vaut $0,8 \mu\text{m}$ et R_z mini $0,4 \mu\text{m}$

Indication de caractéristiques spéciales d'état de surface

Il peut être nécessaire, dans certains cas, de spécifier des exigences fonctionnelles concernant l'état de surface, un état de surface à réaliser par une méthode particulière, un traitement ou un revêtement, etc. Toutes ces indications doivent être indiquées dans l'emplacement "b".



Indication d'ondulation de surface ou d'une longueur de base

S'il est nécessaire de prescrire une hauteur d'ondulation en micromètres (μm) ou une longueur de base en mm, celle-ci doit être indiquée à l'emplacement "c" sous le trait prolongeant la branche la plus longue des symboles des figures précédentes.

Remarque : pour R_a et R_z la longueur de base doit être omise si elle est égale à celle donnée dans l'ISO 4288

Longueurs de base de rugosité normalisées (extraits ISO 4288) :

Longueurs de base pour le mesurage de R_a , R_q , etc. : extraits ISO 4288 Tableau 6

R_a (μm)	Longueur de base de rugosité l_r (mm)	Longueur d'évaluation de rugosité l_n (mm)
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Longueurs de base pour le mesurage de R_z , R_v , R_p , R_c et R_t : extraits ISO 4288 Tableau 7

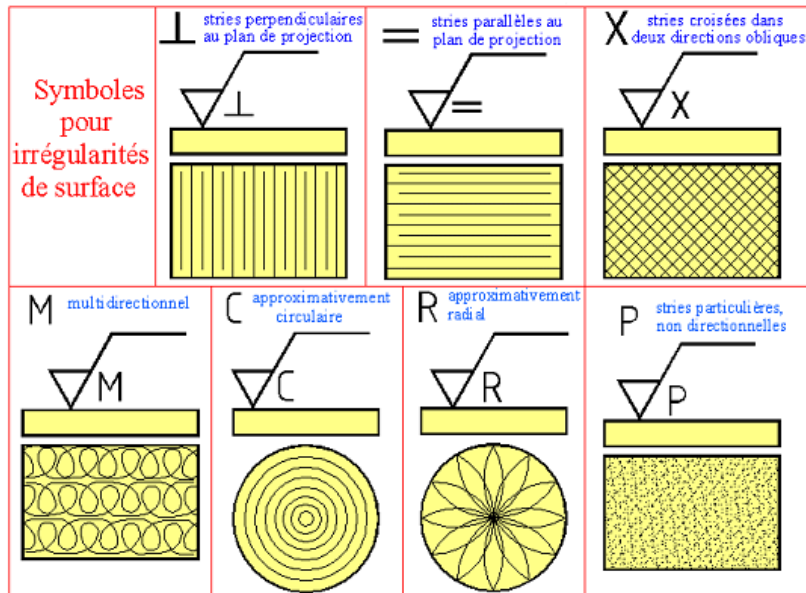
R_z (μm)	Longueur de base de rugosité l_r (mm)	Longueur d'évaluation de rugosité l_n (mm)
$(0,025) < R_z \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z \leq 200$	8	40

VIII. Symboles graphiques pour les irrégularités de surface

S'il est nécessaire de spécifier les irrégularités de surface par usinage (traces d'usinage) et en particulier la direction des stries, le symbole graphique approprié doit être ajouté au symbole d'état de surface à l'emplacement "d".

Remarques : la direction des stries résulte généralement du procédé de fabrication employé.

Symboles normalisés pour irrégularités de surface



Exemples d'indications :



Fonctions et états de surface

Fonction	Exemple d'application	Ra
Frottement de glissement	Glissière de machines-outils	0,4
Frottement de roulement	Chemin de roulement à billes	0,02
Étanchéité dynamique	Portée pour joint à lèvres	0,3
Étanchéité statique	Surface d'étanchéité glacée (sans joint)	0,1
Ajustement fixe avec contrainte	Portée de roulement	0,8
Outils coupants (arête)	Outils en carbure	0,2

IX. Comment mesurer l'état de surface

Propriété :

- Échantillon de comparaison visuelle
- Par contact (stylus)
- Sans-contact : Optique (laser)

X. Outils de comparaison visuelle

On emploie un comparateur de profils pour comparer au moyen de la vue ou du toucher le profil d'une surface avec les diverses surfaces de référence du comparateur. 18

Rugotest

Le Rugotest est un test de comparaison qui permet une surface en utilisant une référence à sa rugosité à juger. La comparaison est effectuée optiquement, à l'œil et au toucher, le toucher du doigt. Il convient de noter que chacun des usinages (tournage, fraisage, ..) et la référence doit correspondre à déterminer la surface.

Utilisation

Le Rugotest est principalement utilisé dans les ateliers mécaniques afin de déterminer si la surface requise a été observée. Contrairement à la mesure exacte de la surface avec de l'instrument de stylet de Rugotest doit être manipulé plus rapide et plus intuitive. Toutefois, étant donné que l'évaluation est très subjective, il est pour les surfaces petites.

Un Rugotest se compose des différentes surfaces de référence qui sont fixés ensemble sur un matériau de support. La plupart du temps, il se trouve dans une pochette en cuir pour protéger les surfaces de référence.



XI. Mesure par contact

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne pas sont suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un profil mètre (rugosimètre). Ces appareils déterminent de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (R_a , R_z ...).

Propriété :

- Précis et répétitif
- Possible d'évaluer une multitude de paramètres
- Abordable
- Certifiable
- Standards existant (ISO, ANSI, BS, DIN, JIS)

Profil mètre :

Un profil mètre est un instrument utilisé pour mesurer le relief d'une surface, notamment dans le but d'en évaluer la rugosité ou la micro-géométrie.

Les profilomètres sont à leur origine dotés d'une pointe très fine en diamant qui lit l'altitude lorsqu'on la déplace le long de la surface. Ce principe est toujours très utilisé, mais il est aujourd'hui complété par nombre de dispositifs optiques.

Profilomètres à contact

Les profilomètres à contact sont basés sur le contact physique entre une pointe en diamant et la surface à mesurer. Un capteur solidaire de la pointe en mesure la position verticale Z lorsqu'on la déplace horizontalement (axe X) sur la surface, ce qui permet ainsi d'établir le profil $Z=f(X)$ de la surface.

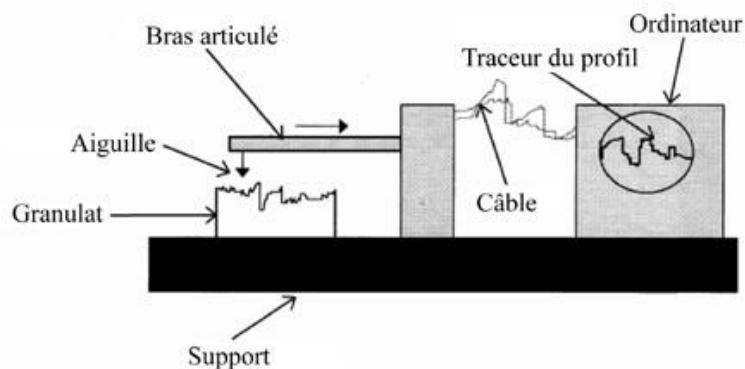
Les profilomètres à contact utilisés pour les matériaux fragiles, notamment dans l'industrie des semi-conducteurs, disposent d'un contrôle de la force d'appui de la pointe.

Les petits profilomètres dont la fonction est la mesure de l'état de surface en atelier sont en général désignés par le terme de **rugosimètres**.



Profilomètre d'état de surface

L'appareil est caractérisé par une aiguille se déplaçant à une vitesse constante sur la surface et dont le déplacement vertical permet l'enregistrement du profil. Il est également constitué d'un conditionneur/amplificateur, d'une unité mécanique d'avancement, d'un calculateur et, selon le cas, d'enregistreurs (imprimantes, tables traçantes, etc.). La figure 2.14 permet de visualiser l'appareil.



Profilomètre d'état de surface à contact

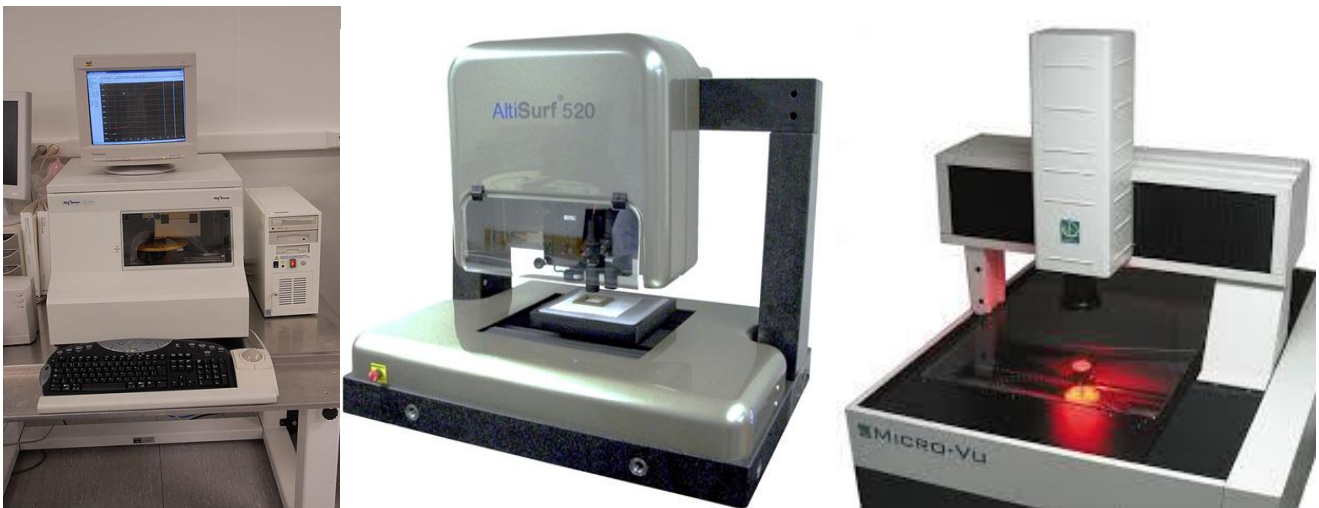
Malgré une précision verticale pouvant aller jusqu'à $10\ \mu\text{m}$ [Courard, 1999], le profilomètre d'état de surface présente plusieurs inconvénients. Par exemple, l'appareil utilisé par Courard [1999] ne permet pas d'enregistrer des amplitudes dépassant 1 mm. Les observations avec ce type d'appareil se limitent donc à des surfaces polies ou légèrement sablées. De plus, le temps nécessaire afin d'analyser une surface est directement relié au pas de mesure. Une augmentation du pas de mesure entraînera une réduction du temps d'analyse, mais la précision de cette analyse s'en trouvera affectée.

XII. Mesure sans contact

Profilomètres optiques à balayage

Les profilomètres optiques à balayage sont munis, comme les profilomètres à contact, d'un capteur de distance qui mesure l'altitude Z d'un seul point (X,Y) de la surface à la fois. La résolution est de quelques micromètres dans le plan horizontal et nanométrique dans la lecture de l'altitude. Le capteur est déplacé de manière à décrire un segment (mesure de profil $Z=f(X)$ ou profilométrie) ou un rectangle (mesure de surface $Z=f(X,Y)$ ou topographie)

Les méthodes les plus résolventes sont basées sur la recherche de la focalisation (Capteur confocalchromatique, Capteur autofocus, Capteur "tuningfork").



Avantages des profilomètres optiques à balayage:

- Sans contact : ils n'endommagent pas la surface.
- Le principe de mesure intégrant des axes horizontaux de déplacement, ces instruments sont très souples en termes de définition de la zone mesurée qui peut être par exemple très longue et très étroite.
- Sur certains appareils modulaires, il est prévu le remplacement du capteur optique par un capteur à contact, ce qui permet de lever le doute sur des surfaces aux propriétés optiques difficiles.

Inconvénients des profilomètres optiques à balayage:

- L'utilisation d'un dispositif mécanique de balayage introduit un bruit mécanique qui se superpose au relief réel de la surface, contrairement aux profilomètres matriciels.

Chapitre 3 :

Contenu

Aperçue historique

Introduction

Principe de la machine à mesurer tridimensionnelle

Constitution d'une MMT

- La structure de déplacement
- Le système de palpation
- Le système électronique
- Le système informatique et le pupitre de commande

Les différents types de machine

- Morphologie
- Différents types de commandes

Technologie des têtes de mesure

Le système de palpation

- Palpeur par contact dynamique
- Palpeur par contact statique

Machines à Mesurer Tridimensionnelles

XIII. Aperçue historique:

La mesure dimensionnelle et géométrique occupent la grande majorité des services de contrôle et métrologie des entreprises. Ces techniques ont subi ces trente dernières années une évolution fulgurante grâce à l'apparition de la **machine à mesurer tridimensionnelle**. Elle a permis de mettre à disposition des ateliers de production un moyen de mesure performant et automatisé. 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. Elles n'ont alors fait qu'évoluer durant toutes ces années aussi bien sur la partie mécanique, que sur la partie logiciel. 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. Longtemps, la MMT avait sa place dans une salle climatisée (stable au niveau thermique et vibratoire), laboratoire de métrologie. Actuellement, avec ces évolutions mécaniques et logiciels, les MMT trouvent leur place dans des milieux plus « hostiles », comme à l'atelier, ou directement sur les lignes de production ...

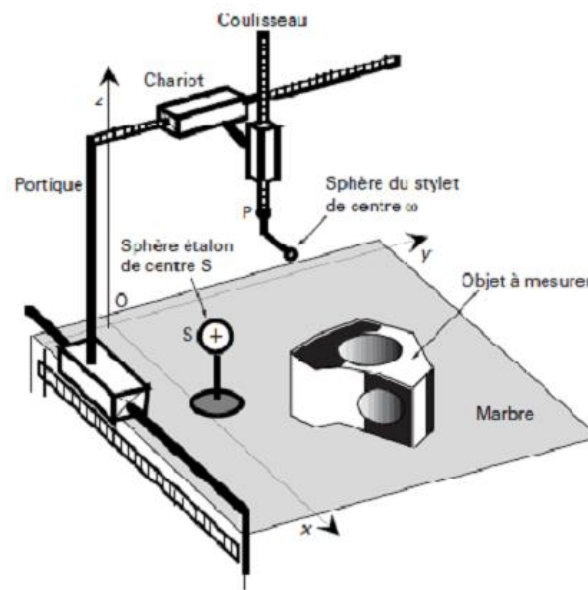
XIV. Introduction

Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMTs) sont des unités importantes dans les systèmes de contrôle **dimensionnel** et **géométrique** des pièces mécaniques. Elles permettent de contrôler la conformité des pièces de forme complexe, en 3D, rapidement et avec une grande précision. Les MMTs doivent être fiables pour réussir leur mission au sein de la chaîne de production. Les pièces mécaniques qui sont contrôlées et certifiées à l'aide des MMTs seront assemblées sur la chaîne de montage, rapidement et sans problème et complèteront leur mission durant leurs cycles de vie anticipés.

La performance de la MMT est en partie représentée par l'exactitude de la position de la touche du stylet par rapport à la pièce à mesurer. Les écarts cinématiques associés aux articulations de la MMT sont parmi les principales causes de l'inexactitude de la position de la touche du stylet par rapport à la pièce à mesurer. Pour garder la fiabilité de la machine dans la chaîne de production, les industriels suivent un plan d'intervention périodique pour la vérification de la performance de la MMT. Il est donc primordial de mettre en place des vérifications intermédiaires qui seront déclenchées soit de façon cyclique (toutes les semaines, tous les mois,...), soit en cas de doute sur une dérive éventuelle de la machine. La vérification périodique de la machine se fait suivant des normes internationales. Une augmentation de l'incertitude sur la mesure traduit une dégradation de la MMT. L'identification des principales sources de dégradation est nécessaire pour faire une action corrective afin de rétablir les capacités métrologiques de la MMT.

XV. Principe de la machine à mesurer tridimensionnelle

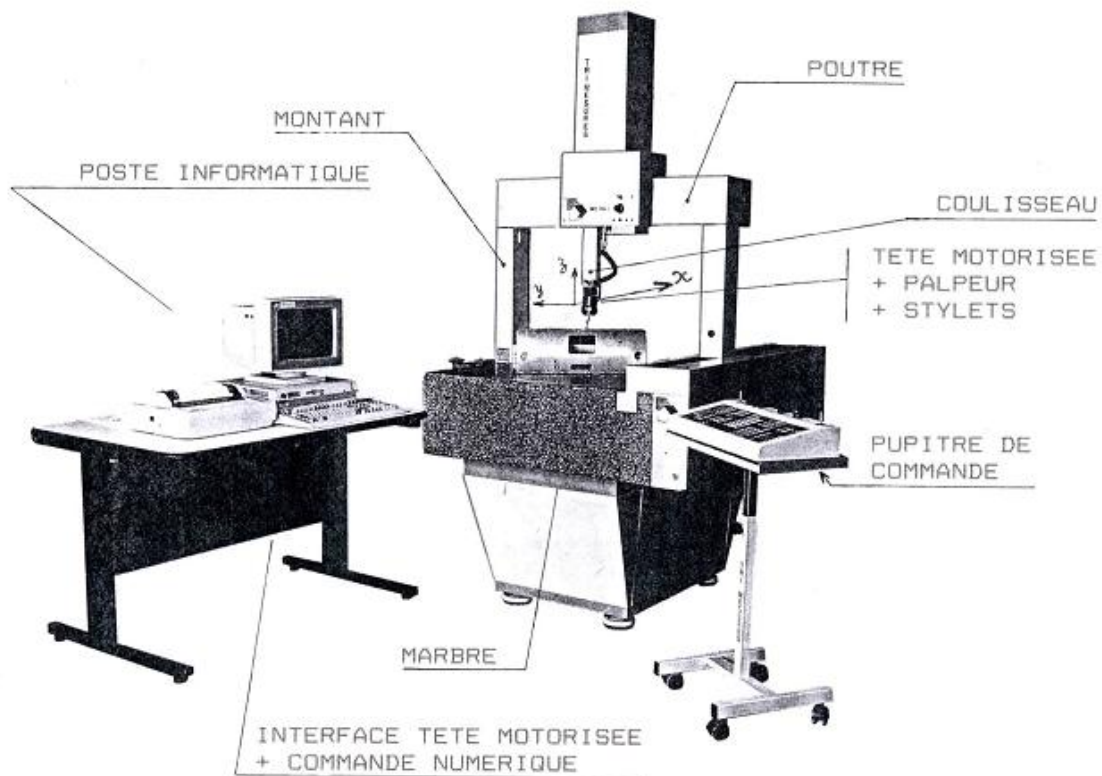
Les MMTs sont constituées principalement de trois axes de mesure et d'un système de palpation doté d'une touche de contact fixée à l'extrémité du dernier axe. En fonction des déplacements des axes de mesures qui sont liés à des règles de mesure de haute précision, il est possible d'estimer les coordonnées x , y et z du point de contact entre la touche du palpeur et la surface à mesurer. La pièce à mesurer est montée sur un marbre. Le système de palpation établit une relation entre le contact physique de la touche du palpeur sur la surface à mesurer et la lecture des trois déplacements (Figure III-1). Les coordonnées calculées sont par la suite traitées par logiciel dans le but d'effectuer des mesures tridimensionnelles et de vérifier les caractéristiques des tolérances dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques.



XVI. Constitution d'une MMT

Une MMT est constituée de 4 sous-ensembles distincts :

- La structure de déplacement
- Le système de palpation
- Le système électronique
- Le système informatique et le pupitre de commande



1. La structure de déplacement :

Elle comprend 3 guidages en translation orthogonaux deux à deux notés X , Y et Z. Ces guidages, sans jeu ni frottements, permettent d'atteindre tous les points d'un volume parallépipédique.

2. Le système de palpation :

Son rôle est de détecter le contact entre le stylet et la pièce et, à cet instant, d'envoyer une impulsion au système électronique pour qu'il lise les coordonnées du point de contact sur les systèmes de mesure.

3. Le système électronique :

Il a plusieurs fonctions essentielles :

- Recevoir les impulsions de contact en provenance de la tête de palpation
- Envoyer les ordres de lecture sur les 3 systèmes de mesure au moment du contact
- Recevoir du système informatique les ordres de mouvement pour la commande des moteurs d'axes (Machines à CN)
- Gérer les sécurités telles que pression d'air mini sur les patins aérostatiques, fins de courses des mouvements etc.

4. Le système informatique et le pupitre de commande :

- Acquisition et mise en mémoire des gammes de contrôle des pièces
- Exécution des gammes de contrôle
- Traitement des informations et édition des résultats
- Logiciel conversationnel permettant l'utilisation de la machine.

XVII. Les différents types de machines

1) Morphologie

Il en existe de différents types qui sont fonction de la morphologie des pièces à mesurer, des précisions à atteindre, de la facilité d'utilisation etc...

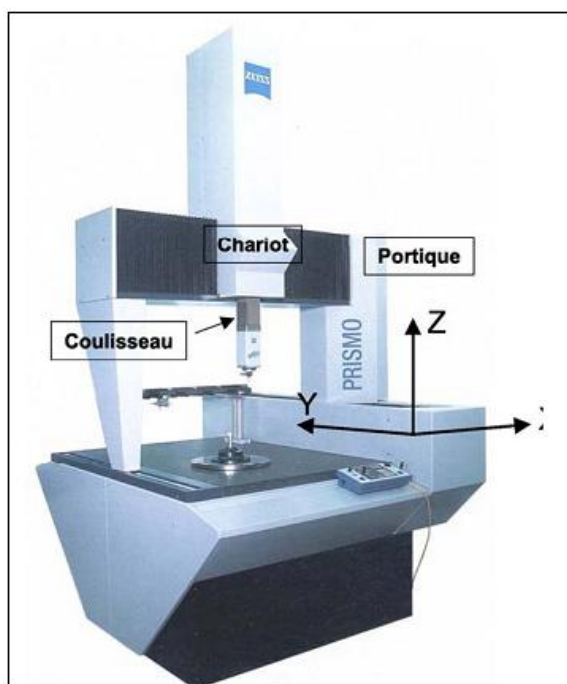
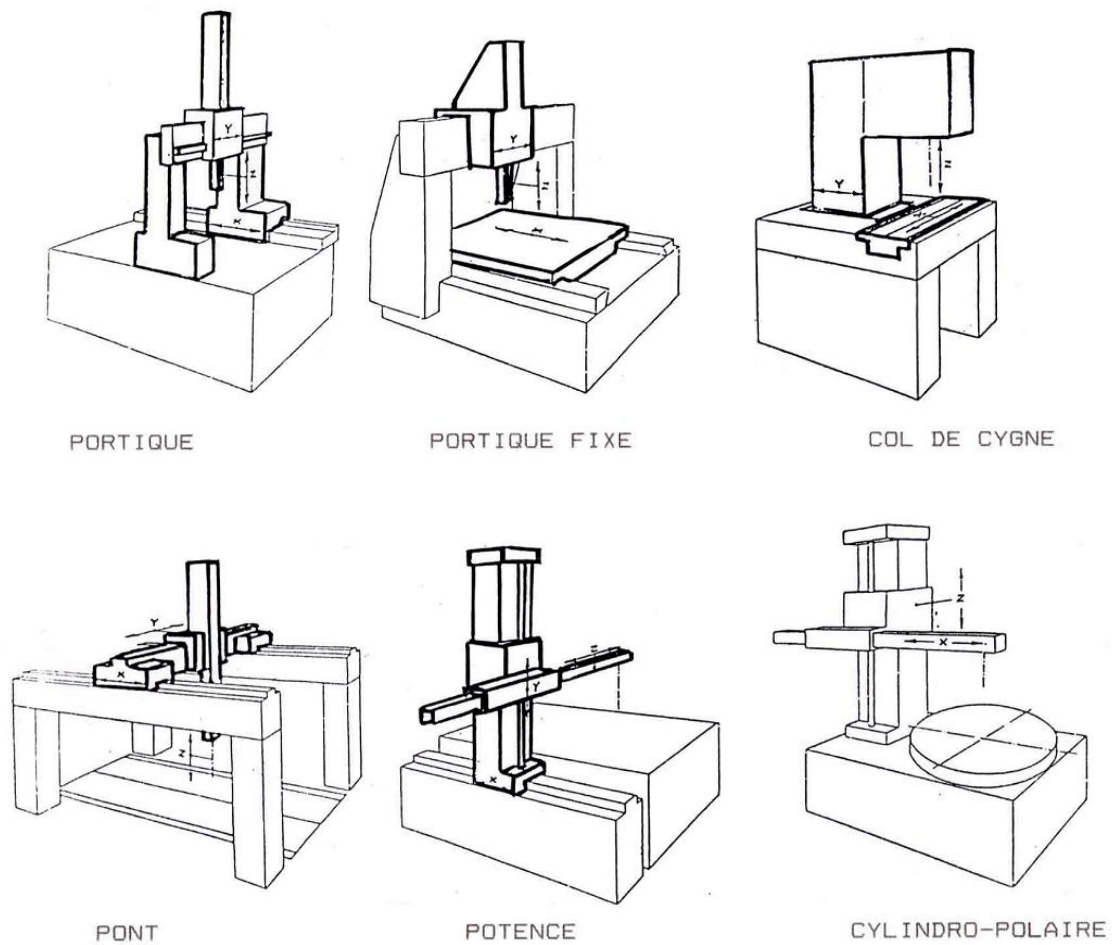


Figure V.1 : machine à mesurer à portique



Figure V.2 : machine à portique fixe



Figure V.3 : Les machines à bras horizontal



Figure V.4 : MMT avec plateau circulaire



Figure V.5 : Différents types des machines

2) Différents types de commandes

Machines Manuelles

C'est l'opérateur qui déplace le palpeur

- Pas de sauvegarde du programme
- La présence de l'opérateur est nécessaire pour chaque palpation
- Incertitudes de mesurage importantes
- Machines de petites dimensions

Machines Motorisées

L'opérateur commande les déplacements par l'intermédiaire de manettes de pilotage, mais la vitesse de déplacement est asservie en mode palpation.

- Plus faible influence de l'opérateur
- Pas de limites en dimensions

Machines à Commande Numérique

Les axes de déplacement sont asservis en vitesse et position.

La pièce est modélisée par des éléments géométriques calculés à partir des points palpés.

- L'écriture d'une gamme C.N. nécessite la définition d'un repère associé à la pièce
- L'exécution d'une gamme ne nécessite plus la présence d'un opérateur
- La précision de palpation ne dépend plus de l'opérateur
- Le choix de la position des points palpés sur la surface n'est fait qu'une seule fois lors de l'apprentissage ou à l'aide d'un logiciel de FAO.

XVIII. Technologie des têtes de mesure

La tête de mesure est un organe dont les coordonnées de l'origine sont connues grâce aux règles de mesure des glissières. Elle permet d'être l'interface entre la machine et la pièce à l'aide :

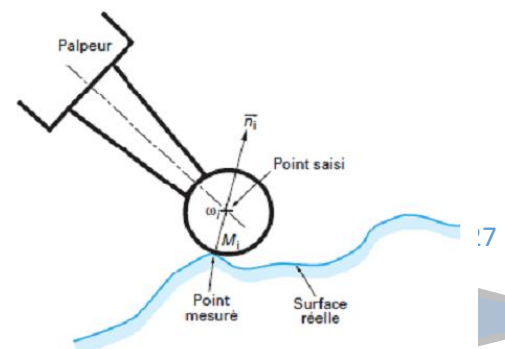
- ✚ soit d'un palpeur (tige qui déclenche un contacteur dès qu'elle rentre en contact avec la pièce) pour l'extraction de points.
- ✚ soit d'un capteur par contact, d'architecture extérieure proche de celle du palpeur mais qui permet la mesure en continu et le relevé de profil par exemple.
- ✚ soit d'un capteur optique qui permet la discrétisation de la surface à mesurer par un grand nombre de points.

La plupart des têtes de mesure permettent plusieurs orientations du palpeur ou du capteur qu'elles portent pour favoriser l'accessibilité aux surfaces à mesurer.

Une MMT matérialise un repère orthonormé à 3 dimensions (O, x, y, z)

Pour chaque point palpé, on recueille les coordonnées du centre du palpeur :

La pièce à mesurer est ensuite modélisée à l'aide des éléments géométriques définis par le préparateur (points, droites, plans, cercles, cylindres, cônes et sphères). A partir du nuage de points palpés, un traitement suivant la règle des moindres carrés permet de définir quantitativement les éléments géométriques.



XIX. Le système de palpation

Pour assurer le palpation, la MMT est équipée d'un palpeur constitué d'une partie détection (déclenchement lors du contact par exemple) et de l'équipement de mesure de la position des différents mobiles.



Figure VII.1 : Le système de palpation

Technologie des palpeurs par contact

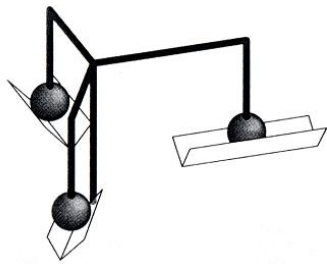
L'idée du palpation universel par contact est simple: il s'agit de détecter la mise en contact d'une bille sur la pièce pour repérer un point sur la surface. Le choix de la valeur de l'effort de contact résulte d'un compromis entre un effort suffisamment important pour garantir la réalité du contact et un effort suffisamment faible pour éviter des déformations excessives. Les valeurs pratiques se situent entre 0,1N et quelques 0,1N. Le diamètre des billes couramment utilisées est situé entre 1 et 8 mm.

Palpeur par contact dynamique

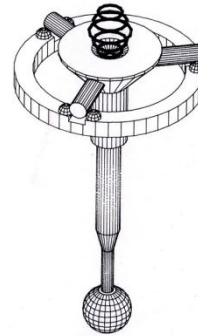
La mesure à la volée consiste à faire fonctionner le palpeur comme un interrupteur basculant au moment précis où la touche de stylet vient au contact de la pièce. Pendant cette phase de travail, la machine doit présenter une vitesse de déplacement constante qui peut être de l'ordre de 0.5 à 1 mètre par minute. Une vitesse constante correspond à une accélération nulle et donc normalement à des effets nuls des inerties des mobiles.

La MMT (machine à mesurer tridimensionnelle) se trouve donc, théoriquement, dans le même état de déformation qu'à l'arrêt. En pratique, les problèmes sont plus complexes (vibrations, effets des entraînements).

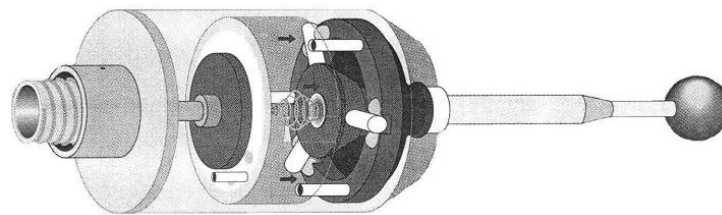
Du point de vue technologique, le palpeur le plus simple est dit « à déclenchement ». Il est conçu à partir d'une liaison dite « de **Boys** », qui est une réalisation axisymétrique d'un positionnement isostatique basée sur six appuis ponctuels regroupés par deux.



Schématisme de la Liaison de Boys



Principe d'un palpeur dynamique à déclenchement



Les groupes de deux appuis sont disposés sur un cercle et à 120 degrés les uns des autres. Le solide mis en position est constitué d'une étoile à trois branches à 120 degrés posée sur les six appuis.

Le stylet est fixé à l'étoile à 120 degrés. L'ensemble constitue un solide posé sur les six points de contact. Au moment du contact entre la pièce et la touche, on passe brutalement d'une situation isostatique à une situation hyperstatique à sept points de contact.

L'étoile à trois branches tend à se déplacer et l'un au moins des six points de contact de la liaison de Boys tend à décoller.

Pour détecter ce décoller, une solution simple consiste à placer en série électrique les six points de contact. Au moment du contact, la résistance du circuit augmente brutalement. Une électronique à seuil déclenche pour une valeur de résistance choisie à l'avance.

Le système décrit ci-dessus n'est pas viable sans un ressort exerçant sur l'étoile à trois branches un effort constant pour garantir un bon comportement des contacts électriques. Il faut également maîtriser l'effort au contact entre la touche et la pièce, et que les accélérations nécessaires pour déplacer la machine entre deux points de mesure ne provoquent pas de déclenchements intempestifs. Ce ressort est tarable en fonction de la géométrie du stylet mis en place.

Le réglage est réalisé en accostant un capteur d'effort (souvent réduit à un peson voire à un pèse-lettre) pour mesurer l'effort de contact dans une direction perpendiculaire à la direction du stylet (Figure VII.2).

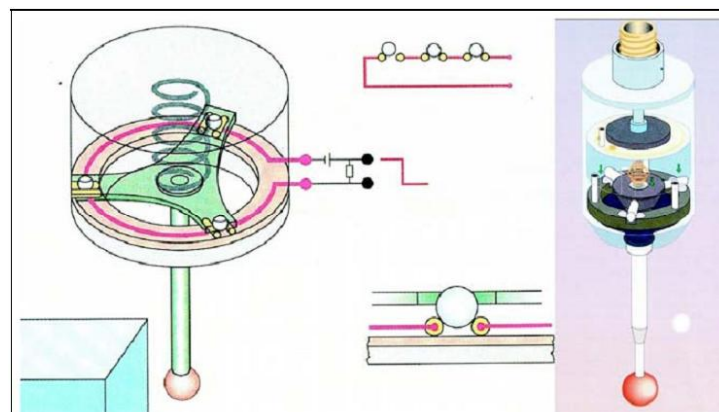


Figure VII.2 : palpeur à contact dynamique

Palpeur par contact statique

Dans le cas du palpéage statique (Figure VII.3), la bille est posée sur la pièce et la machine à mesurer s'arrête.

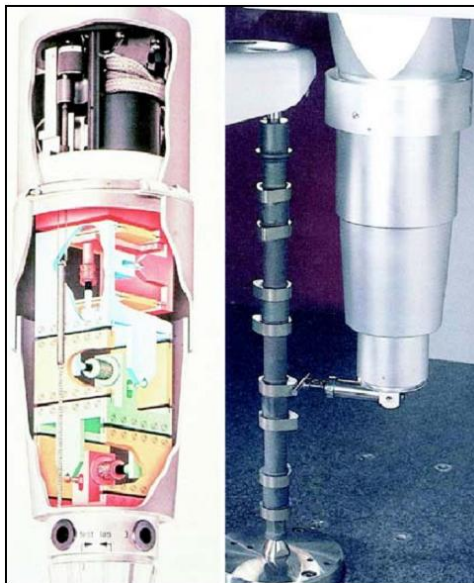


Figure VII.3 : palpeur à contact statique

En l'absence de frottement (en première approximation), l'effort au contact bille-pièce est normal à la matière. Il s'agit de contrôler cet effort (ordre de grandeur pratique entre 0.1N et 0.4N environ) tout en mesurant la position de la tête avec une incertitude de l'ordre de 0,1 μm .

Un parallélogramme flexible réalise, pour de faibles déflexions, un guidage linéaire sans jeu et sans frottement. Un système de lecture de déplacement (transformateur différentiel ou petite règle) mesure le déplacement du guidage. Un système de génération actif (électroaimant) ou passif (ressort) d'effort génère la composante de l'effort de contact parallèle à la direction du guidage. Cet ensemble constitue un palpeur unidirectionnel. Il « suffit » de superposer trois palpeurs unidimensionnels pour constituer une véritable petite machine à mesurer.

La course de travail de ces palpeurs est de l'ordre de 100 à 300 micromètres. La course de sécurité est de l'ordre de ± 3 millimètres à ± 5 millimètres en fonction des constructeurs.