

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة مصطفى بن بولعيد - باتنة 2
Université Mostefa Ben Boulaïd - Batna 2

Faculté de technologie
Département de mécanique



كلية التكنولوجيا
قسم الميكانيك

L2 GM/AERO

Métrologie (Matière découverte)



Préparé par : Dr. HAMADI Latifa

Année Universitaire 2022/ 2023

Chapitre 1. Généralités sur la métrologie

Objectifs spécifiques :

A l'issue de ce chapitre l'étudiant sera capable de :

- Comprendre les notions de base de la métrologie.
- Comprendre l'importance de la métrologie.
- Connaître les différents types de métrologie.

1. Introduction

L'amélioration de la qualité que ce soit des produits ou des processus est devenue une préoccupation majeure des entreprises industrielles. Relever ce défi, impose aux entreprises de mieux maîtriser les instruments de mesure qu'elles utilisent. Toute erreur de conception ou de fabrication d'un produit peut avoir des conséquences désastreuses pour l'entreprise.

La mesure est devenue de plus en plus indispensable dans tous les secteurs d'activité. Elle permet de garantir les propriétés d'usage des produits, des échanges commerciaux, de maîtriser le processus de fabrication et de protéger la santé. Toutefois les instruments de mesure n'ont de signification que si les valeurs qu'ils indiquent sont exactes, c'est pourquoi l'organisation de la fonction métrologique dans l'entreprise est primordiale. Elle oriente la gestion des moyens de mesure en fonction des besoins réels de l'entreprise et permet de s'assurer, à tout moment, que les instruments sont encore en état de bon fonctionnement et que toute éventuelle dérive reste maîtrisée et connue et ce à travers les opérations de vérification et de raccordement aux étalons nationaux ou internationaux.

La fonction métrologique est l'un des instruments centraux de la démarche qualité des entreprises et prend toute son importance aussi bien en tant que démarche volontaire interne à l'entreprise qu'en tant que démarche contractuelle pouvant aboutir à la certification. C'est un point de passage obligé pour l'obtention de la qualité des produits. La qualité ne se contrôle pas, elle se fabrique, pour cela il faut donner au producteur les moyens d'effectuer les mesures indispensables à la qualification du produit. La mesure dimensionnelle doit intervenir à chaque phase de l'élaboration d'une pièce, par son intégration sur le poste de travail. De plus il faut surveiller le processus de fabrication pour prévenir les défaillances.

La métrologie à quoi ça sert ?

La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par « science de la mesure ». La métrologie s'intéresse traditionnellement à la détermination de caractéristiques (appelées grandeurs) qui peuvent être fondamentales comme par exemple une longueur, une masse, un temps, ou dérivées des grandeurs fondamentales comme par exemple une surface, une vitesse. Cependant, dans les domaines courants des essais, il existe de nombreuses caractéristiques n'ayant qu'une relation indirecte avec ces grandeurs. C'est le cas, par exemple, de la dureté, de la viscosité, qui peut poser des problèmes dans l'interprétation.

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité. Dans le langage courant des «métrologues», on entend souvent dire mesurer c'est comparer.

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions dans de nombreux domaines, tels que :

- Acceptation d'un produit (mesure de caractéristiques, de performances, conformité à une exigence).
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé.
- Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication.
- Validation d'une hypothèse scientifique.
- Protection de l'environnement.
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

L'ensemble de ces décisions concourt à la qualité des produits ou des services : on peut qualifier quantitativement la qualité d'un résultat de mesure grâce à son incertitude.

En effet sans incertitude les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés :

- Soit entre eux (essais croisés).
- Soit par rapport à des valeurs de référence spécifiée dans une norme ou une spécification (conformité d'un produit).

2. Définition de la Métrologie

La métrologie peut se définir comme étant " la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude ". La spécificité de la discipline métrologique n'est pas dans la mesure elle-même, mais dans la validation du résultat. Au sens large ; c'est une science de la **mesure**.



3. Vocabulaire métrologique

Si la gestion de la fonction métrologique dans les entreprises reste accessible, elle demande un minimum de connaissances relatives à son vocabulaire, sa terminologie ou encore aux mathématiques. Il ne s'agit pas ici de revenir sur les concepts mathématiques, mais de définir les principales notions employées lorsque l'on évoque la fonction métrologique. L'un des prérequis pour appréhender la métrologie et ses concepts est de se familiariser avec le vocabulaire. Dans ce qui suit sont définies les principales notions métrologiques tirées du **VIM** (Vocabulaire International de la Métrologie).

Mesure et mesurage :

Le mot mesure a, dans la langue française courante, plusieurs significations. A titre d'exemple :

- Une valeur : la mesure d'une distance de 20 m.
- Un résultat : une mesure approchée à 1% près.
- Une action : réaliser une mesure électrique.
- Un instrument : une mesure de capacité.

Ainsi, pour éviter toute ambiguïté, le mot « mesurage » a été introduit en métrologie pour qualifier l'action de mesurer.

Définition du mesurage :

Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur. Ou bien : c'est l'ensemble des opérations permettant d'attribuer une valeur à la grandeur mesurée.

Définition d'une grandeur (mesurable) :

Propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence. On peut mesurer un temps, une masse, une longueur, une vitesse, une proportion... etc.

Étalonnage : les valeurs obtenues dans un mesurage sont le résultat de mesures effectuées dans un processus de mesure comportant un instrument de mesure ; cet appareil, susceptible de variabilité dans le temps doit être étalonné avec un étalon et vérifié. D'une autre façon : 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.

Incertitude : la variabilité des valeurs obtenues dans un mesurage est ce qu'on appelle l'incertitude de mesure. Cette incertitude doit être déterminée comme une dispersion, avec des règles complémentaires appliquées aux

incertitudes. La méthode de détermination de l'incertitude de mesure fait l'objet d'un fascicule métrologique appelé Guide pour l'expression de l'Incertitude de Mesure ou **GUM**.

Étalon : Une mesure n'est jamais exacte. Elle est toujours établie en comparaison avec une unité, un étalon invariable, ou avec une référence dérivée de cet étalon. Un étalon est un instrument de mesurage destiné à définir ou matérialiser, conserver ou reproduire l'unité de mesure d'une grandeur. Les cales étalon sont des parallélépipèdes généralement en acier dont la longueur entre deux des faces (appelées mesurandes) est parfaitement connue. Les cales étalons sont utilisées pour étalonner ou régler des appareils de mesure de longueur.

4. Différents types de métrologie

On peut distinguer, artificiellement, différents aspects de la métrologie pour faciliter sa compréhension :

1) La métrologie légale :

Elle concerne toutes les activités de mesure relatives aux exigences définies par une réglementation (imposées par l'état). Ce sont, par exemple :

- Les mesures effectuées dans le cadre des transactions commerciales (mesure du volume du carburant que vous achetez dans une station-service, mesure des quantités de produits pré-emballés, mesure des masses de bagages avant de monter à bord d'un avion, mesure de l'énergie électrique consommée par une habitation).
- Les mesures effectuées pour définir le prix d'une taxe ou l'importance d'une sanction (cinémomètre : mesure des vitesses de voitures par les radars sur l'autoroute) ;
- Les mesures des rejets de polluants.

2) La métrologie industrielle :

La métrologie industrielle joue le rôle d'interface entre les laboratoires nationaux de métrologie et les citoyens i.e. les utilisateurs finaux des instruments de mesure : les écoliers avec leurs règles et rapporteurs, les industriels, les commerçants, les artisans, etc. Elle assure notamment le raccordement aux étalons nationaux.

3) La métrologie fondamentale (dite de laboratoire, scientifique) :

Science des mesurages et ses applications.

La métrologie étudie donc, tous les aspects théoriques et pratiques (règles, méthodes, instruments) des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine

d'application.

Chapitre 2. Système international de mesure SI

2.1. Introduction

Cette brochure a pour objet de présenter les informations nécessaires à la définition et à l'utilisation du Système International d'unités, universellement connu sous l'abréviation SI. Le système de grandeurs à utiliser avec le SI, y compris les équations reliant ces grandeurs entre elles, correspond en fait aux grandeurs et équations de la physique, bien connues de tous les scientifiques, techniciens et ingénieurs. Cependant, dans quelques domaines spécialisés, en particulier physique théorique, il peut exister des raisons sérieuses justifiant l'emploi d'autres systèmes ou d'autres unités. Quelles que soient ces unités, il est important de respecter les symboles et leur représentation conformes aux recommandations internationales en vigueur. Le système SI est un système cohérent d'unités qui comporte sept unités de base.

2.2. Unités de bases du SI

Au nombre de sept, elles doivent être considérées comme indépendantes au point de vue dimensionnelle (Tableau 2-1).

Grandeur de base		Unité SI de base	
Nom de la grandeur de base	Symbole	Nom de la unité SI de base	Symbole
Longueur	$l, x, r, \text{etc.}$	mètre	m
Masse	M	kilogramme	kg
temps, durée	T	seconde	s
courant électrique	I, i	ampère	A
température thermodynamique	T	kelvin	K
quantité de matière	N	mole	mol
intensité lumineuse	I_v	candela	cd

Tableau 2-1 : Unités de base du SI

2.2.1. Unité de longueur: le mètre (symbole: m)

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299792458 de seconde

2.2.2. Unité de masse : le kilogramme (symbole : kg)

Le kilogramme est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme

2.2.3. Unité de temps : la seconde (symbole: s)

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental du césium 133

2.2.4. Unité de courant électrique: l'ampère (symbole : A)

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux circuits conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur

2.2.5. Unité de température thermodynamique : le kelvin (K)

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Aussi que l'unité de kelvin et son symbole K sont utilisés pour exprimer un intervalle ou une différence de température.

Remarque : en dehors de la température thermodynamique (symbole : T) exprimée en kelvins, on utilise aussi la température Celsius (symbole t) définie par l'expression $t=T-T_0$

2.2.6. Unité de quantité de matière : la mole (symbole: mol)

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0, 012 kilogramme de carbone 12

Remarque : Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

2.2.7. Unité d'intensité lumineuse : la candela (symbole : cd)

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian

2.3. Unités dérivées

Elles sont formées de manière cohérente à partir des unités de base (Tableau 2-2). Certaines unités dérivées ont reçu un nom spécial (Tableau 2-3) qui peut à son tour, être utilisé pour former d'autres noms d'unités (Tableau 2-4).

Grandeur dérivée		Unité SI dérivée cohérente	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Superficie	A	mètre carré	m^2
Volume	V	mètre cube	m^3
Vitesse	v	mètre par seconde	$m\ s^{-1}$
Accélération	a	mètre par seconde carrée	$m\ s^{-2}$
nombre d'ondes	σ	mètre à la puissance moins un	m^{-1}
masse volumique	ρ	kilogramme par mètre cube	$kg\ m^{-3}$
masse surfacique	ρ_A	kilogramme par mètre carré	$kg\ m^{-2}$
volume massique	v	mètre cube par kilogramme	$m^3\ kg^{-1}$
densité de courant	j	ampère par mètre carré	$A\ m^{-2}$
champ magnétique	H	ampère par mètre	$A\ m^{-1}$
concentration de quantité de matière, concentration	c	mole par mètre cube	$mol\ m^{-3}$
concentration massique	ρ, γ	kilogramme par mètre cube	$kg\ m^{-3}$
luminance lumineuse	L_v	candela par mètre carré	$cd\ m^{-2}$
indice de réfraction	n	(le nombre) un	1
perméabilité relative	μ_r	(le nombre) un	1

Tableau 2-2 : Exemples d'unités SI dérivées cohérentes exprimées à partir des unités de base

Grandeur dérivée	Unité SI dérivée cohérente			
	Nom	Symbole	Expression utilisant d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
Fréquence	Hertz	Hz		s^{-1}
Force	Newton	N		$m\ kg\ s^{-2}$
pression, contrainte	Pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
énergie, travail, quantité de chaleur	Joule	J	$N\ m$	$m^2\ kg\ s^{-2}$
puissance, flux énergétique	Watt	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
température Celsius	degré Celsius	$^{\circ}C$		K
flux lumineux	Lumen	lm	$cd\ sr$	cd
luminance lumineuse	Lux	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
activité d'un radionucléide	Becquerel	Bq		s^{-1}

Tableau 2-3 : Unités SI dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Grandeur dérivée	Nom	Unité SI dérivée cohérente	
		Symbole	Expression en unités SI de base
viscosité dynamique	pascal seconde	Pa s	$m^{-1} kg s^{-1}$
moment d'une force	newton mètre	N m	$m^2 kg s^{-2}$
tension superficielle	newton par mètre	N/m	$kg s^{-2}$
flux thermique surfacique, éclairage énergétique	watt par mètre carré	W/m ²	$kg s^{-3}$
capacité thermique, entropie	joule par kelvin	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
capacité thermique massique, entropie massique	joule par kilogramme kelvin	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
énergie massique	joule par kilogramme	J/kg	$m^2 s^{-2}$
conductivité thermique	watt par mètre kelvin	W/(m K)	$m kg s^{-3} K^{-1}$
énergie volumique	joule par mètre cube	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$
champ électrique	volt par mètre	V/m	$m kg s^{-3} A^{-1}$
énergie molaire	joule par mole	J/mol	$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$
entropie molaire, capacité thermique molaire	joule par mole kelvin	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
exposition (rayons x et γ)	coulomb par kilogramme	C/kg	$kg^{-1} s A$
débit de dose absorbée	gray par seconde	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
intensité énergétique	watt par stéradian	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
luminance énergétique	watt par mètre carré stéradian	W/(m ² sr)	$m^2 m^{-2} kg s^{-3} = kg s^{-3}$
concentration de l'activité catalytique	katal par mètre cube	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

Tableau 2-4 : Exemples d'unités SI dérivées cohérentes dont le nom et le symbole comprennent des unités SI dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

2.4. Unités supplémentaires

A côté de ces unités de base et des unités dérivées, il existe des unités supplémentaires, au nombre de deux :

- l'unité d'angle plan le radian (symbole : rad); le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon,
- l'unité d'angle solide : le stéradian (symbole : sr); le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

Les grandeurs angle plan et angle solide doivent être considérées comme des unités dérivées sans dimension qui peuvent être utilisées ou non dans les expressions des unités

dérivées (Tableau 2-5).

Grandeur	Unité SI	
	Nom	Symbole
vitesse angulaire	radian par seconde	rad.s ⁻¹
accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad.s ⁻²
luminance énergétique	watt par mètre carre stéradian	W.m ⁻² .sr ⁻¹

Tableau 2-5 : Exemples d'unités SI dérivées exprimées en utilisant des unités supplémentaires

2.5. Multiples et sous-multiples

Lorsqu'une unité s'avère trop grande ou trop petite, pour l'emploi envisagé, on utilise des multiples ou des sous-multiples exclusivement décimaux. Ils sont obtenus en joignant un préfixe, choisi (Tableau 2-6), au nom de l'unité.

Facteur	Nom	Symbole	Facteur	Nom	Symbole
10 ¹	déca	da	10 ⁻¹	déci	d
10 ²	hecto	h	10 ⁻²	centi	c
10 ³	kilo	k	10 ⁻³	milli	m
10 ⁶	méga	M	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n
10 ¹²	téra	T	10 ⁻¹²	pico	p
10 ¹⁵	péta	P	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻²⁴	yocto	y

Tableau 2-6 : Préfixes SI

Chapitre 3. Mesures et contrôles

3.1. Introduction

La métrologie en mécanique est l'ensemble des moyens techniques utilisés pour la mesure et le contrôle de pièces mécaniques. Elle permet de déterminer la conformité des produits, mais elle participe aussi à l'amélioration de la qualité. En effet, on ne peut valider une action sur un procédé qu'en vérifiant le résultat de cette action par une mesure.

En mécanique générale, la métrologie des fabrications s'intéresse :

- au contrôle des pièces exécutées ou en cours d'usinage
- au contrôle, sur machine de la position de la pièce par rapport à l'outil
- à la vérification géométrique des machines-outils
- au contrôle statistique des performances possibles sur chaque machine-outil.

En mécanique automobile, la métrologie s'intéresse :

- au contrôle des organes mécaniques pouvant subir une usure ou une déformation due au fonctionnement (ex: frottement cylindre/piston).

Les mesures et/ou les contrôles de pièces mécaniques s'effectuent en respectant les conditions suivantes :

- Température ambiante de la pièce à contrôler et des instruments de mesures voisine de 20°
- Pièce à contrôler propre
- Ebavurage convenable
- Précision des appareils de mesures impose :
 - manipulation soignée (pas de choc)
 - entretien régulier et approprié
 - rangement systématique après utilisation.

Si la métrologie dimensionnelle permet de vérifier ou de contrôler la conformité des pièces, en mécanique, cette vérification et ce contrôle doivent se faire par rapport au dessin de définition.

3.2. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle

3.2.1. Définition

Le dessin de définition est un document, établi par le bureau d'études, qui représente un cahier des charges ou un contrat entre les concepteurs (bureau d'étude), ceux du bureau des méthodes et les métrologues (contrôle de qualité).

Le dessin de définition décrit complètement et sans ambiguïté les exigences auxquelles la pièce doit satisfaire dans l'état de finition qui est demandé et concerne généralement une seule entité. Il doit comporter le maximum de précisions à savoir les dimensions de la pièce avec les tolérances, la rugosité, les caractéristiques mécaniques ou physico-chimiques des matériaux, les limites de résistance et toutes autres caractéristiques nécessaire à la réalisation de cette pièce (Figure 3-1).

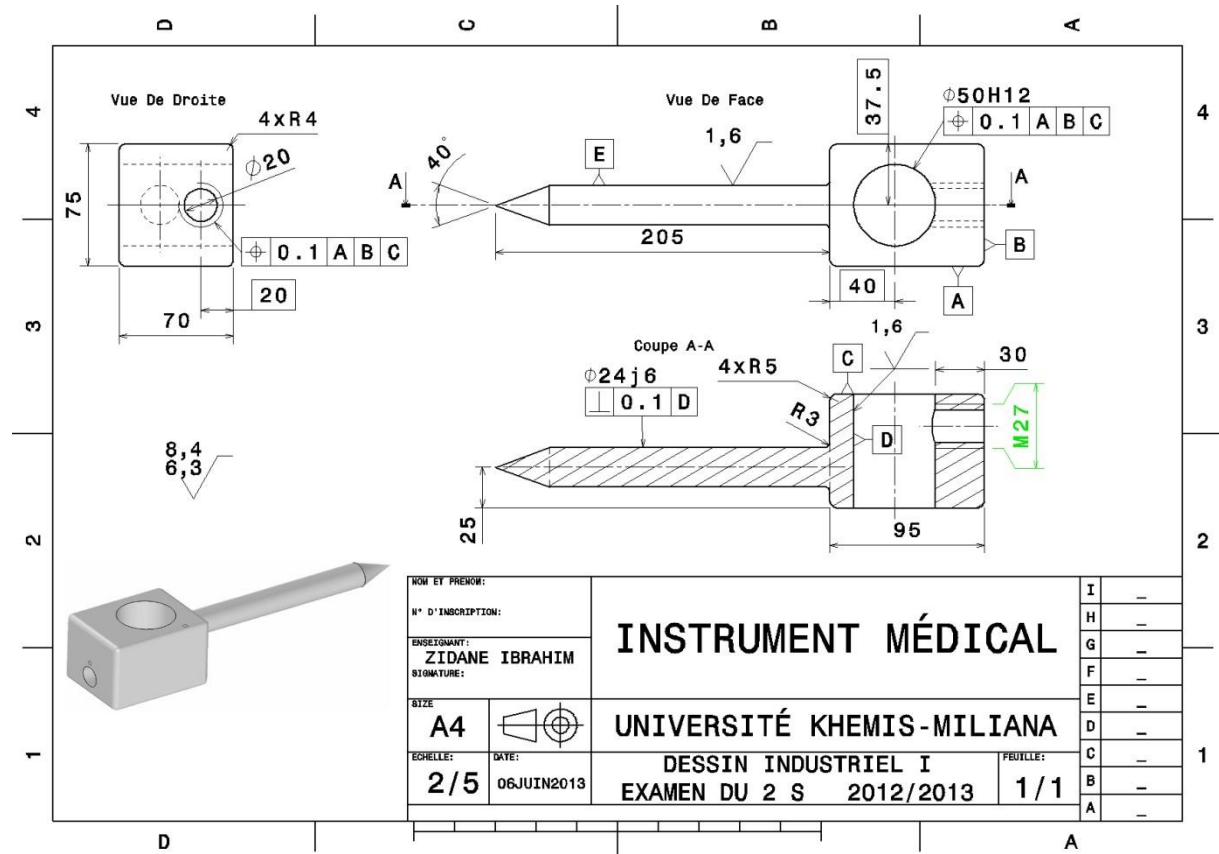


Figure 3-1 : Exemple d'un dessin de définition

3.2.2. Spécifications d'un dessin de définition

Les pièces manufacturées sont conçus sur des dessins de définitions. Ces dessins comportent une représentation graphique de chaque pièce à réaliser ainsi que des annotations complémentaires dont fait partie la cotation. La métrologie n'a de sens que si le concepteur et le métrologue interprètent cette cotation de la même manière. Les spécifications d'un dessin de définition sont classées en trois grandes familles :

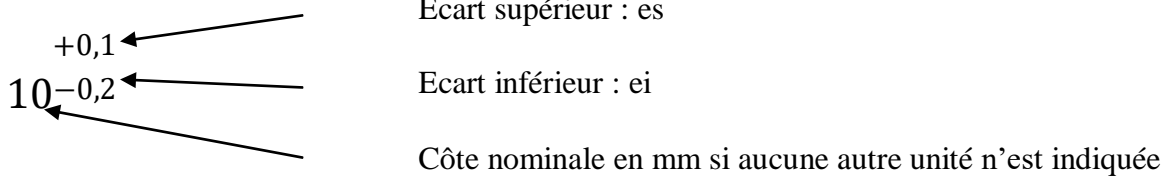
- Spécifications dimensionnelles et angulaires.
- Spécifications géométriques.
- Spécifications d'état de surface.

3.2.2.1. Spécifications dimensionnelles et angulaires

Les spécifications dimensionnelles peuvent se présenter sous plusieurs formes :

- Cas général

Exemple :



La plus grande pièce acceptée est 10,1 : tolérance supérieure Ts

La plus petite pièce acceptée est 9,8 : tolérance inférieure Ti

La différence entre Ts et Ti s'appelle Intervalle de Tolérance : IT=0,3

- Tolérance et Ajustement

Exemple : 10H7g6

Ce type de cotation correspond à des valeurs numériques figurant dans les tableaux des ajustements (Tableau 3-1 et Tableau 3-2). En mécanique, on ajuste très souvent des pièces de révolution. La cotation permettant d'obtenir un jeu important, faible ou un serrage, a déjà été déterminée. Le concepteur dispose d'un tableau qui le guide dans le choix des lettres à inscrire à la suite de la cote nominale en fonction du fonctionnement souhaité.

Le fabricant et le métrologue utilisent le même tableau des ajustements permettant de faire la correspondance entre l'ajustement normalisé et la tolérance chiffrée.

Les lettres majuscules sont utilisées pour les alésages (partie femelle). Les lettres minuscules correspondent à l'arbre (partie mâle). Les chiffres donnent la qualité de la cote. Plus les chiffres sont petits, plus l'intervalle de tolérance est petit (ajustement précis).

Exemples :

1. Ø 45 f7 ou arbre Ø 45^{-0,025}_{-0,060}

La première désignation des tolérances est utilisée généralement pour la fabrication en séries où le contrôle des pièces usinées s'effectue par des calibres à limites (calibres tolérances).

ECARTS DES ALESAGES (en microns)

ALESAGE	PALIERS DE DIAMETRES (en mm)												
	> 0 ≤ 3	> 3 < 6	> 6 < 10	> 10 < 18	> 18 < 30	> 30 < 50	> 50 < 80	> 80 < 120	> 120 < 180	> 180 < 250	> 250 < 315	> 315 < 400	> 400 < 500
D10	+60 +20	+78 +30	+98 +40	+120 +50	+149 +65	+180 +80	+220 +100	+260 +120	+305 +145	+355 +170	+400 +190	+440 +210	+480 +230
F7	+16 +6	+22 +10	+28 +13	+34 +16	+41 +20	+50 +25	+60 +30	+71 +36	+83 +43	+96 +50	+108 +56	+119 +62	+131 +68
G6	+8 +2	+12 +4	+14 +5	+17 +6	+20 +7	+25 +9	+29 +10	+34 +12	+39 +14	+44 +15	+49 +17	+54 +18	+60 +20
H6	+6 0	+8 0	+9 0	+11 0	+13 0	+16 0	+19 0	+22 0	+25 0	+29 0	+32 0	+36 0	+40 0
H7	+10 0	+12 0	+15 0	+18 0	+21 0	+25 0	+30 0	+35 0	+40 0	+46 0	+52 0	+57 0	+63 0
H8	+14 0	+18 0	+22 0	+27 0	+33 0	+39 0	+46 0	+54 0	+63 0	+72 0	+81 0	+89 0	+97 0
H9	+25 0	+30 0	+36 0	+43 0	+52 0	+62 0	+74 0	+87 0	+100 0	+115 0	+130 0	+140 0	+155 0
H10	+40 0	+48 0	+58 0	+70 0	+84 0	+100 0	+120 0	+140 0	+160 0	+185 0	+210 0	+230 0	+250 0
H12	+100 0	+120 0	+150 0	+180 0	+210 0	+250 0	+300 0	+350 0	+400 0	+460 0	+520 0	+570 0	+630 0
J7	+4 -8	+6 -6	+8 -7	+10 -8	+12 -9	+14 -11	+18 -12	+22 -13	+26 -14	+30 -16	+36 -16	+39 -18	+43 -20
K6	0 -6	+2 -6	+2 -7	+2 -9	+2 -11	+3 -13	+4 -15	+4 -18	+4 -21	+5 -24	+5 -27	+7 -29	+8 -32
M7	-2 -12	0 -12	0 -15	0 -18	0 -21	0 -25	0 -30	0 -35	0 -40	0 -46	0 -52	0 -57	0 -63
N9	-4 -29	0 -30	0 -36	0 -43	0 -52	0 -62	0 -74	0 -87	0 -100	0 -115	0 -130	0 -140	0 -155
P6	-6 -12	-9 -17	-12 -21	-15 -26	-18 -31	-21 -37	-26 -45	-30 -52	-36 -61	-41 -70	-47 -79	-51 -87	-55 -95
P9	-9 -31	-12 -42	-15 -51	-18 -61	-22 -74	-26 -88	-32 -106	-37 -124	-43 -143	-50 -165	-56 -186	-62 -202	-68 -223

Tableau 3-1 : Tableau des ajustements pour l'alésage (en micron)

ECARTS DES ARBRES (en microns)

arbre	PALIERS DE DIAMETRES (en mm)												
	< 0 ≤ 3	> 3 < 6	> 6 < 10	> 10 < 18	> 18 < 30	> 30 < 50	> 50 < 80	> 80 < 120	> 120 < 180	> 180 < 250	> 250 < 315	> 315 < 400	> 400 < 500
d9	-20 -45	-30 -60	-40 -75	-50 -93	-65 -117	-80 -142	-100 -174	-120 -207	-145 -245	-170 -285	-190 -320	-210 -350	-230 -385
d11	-20 -80	-30 -105	-40 -130	-50 -160	-65 -195	-80 -240	-100 -290	-120 -340	-145 -395	-170 -460	-190 -510	-210 -570	-230 -630
e7	-14 -24	-20 -32	-25 -40	-32 -50	-40 -61	-50 -75	-60 -90	-72 -107	-85 -125	-100 -146	-110 -162	-125 -182	-135 -198
e9	-14 -39	-20 -50	-25 -61	-32 -75	-40 -92	-50 -112	-60 -134	-72 -159	-85 -185	-100 -215	-110 -240	-125 -265	-135 -290
f6	-6 -12	-10 -18	-13 -22	-16 -27	-20 -33	-25 -41	-30 -49	-36 -58	-43 -68	-50 -79	-56 -88	-62 -98	-68 -108
f7	-6 -16	-10 -22	-13 -28	-16 -34	-20 -41	-25 -50	-30 -60	-36 -71	-43 -83	-50 -96	-56 -106	-62 -119	-68 -131
g5	-2 -6	-4 -9	-5 -11	-6 -14	-7 -16	-9 -20	-10 -23	-12 -27	-14 -32	-15 -35	-17 -40	-18 -43	-20 -47
g6	-2 -8	-4 -12	-5 -14	-6 -17	-7 -20	-9 -25	-10 -29	-12 -34	-14 -39	-15 -44	-17 -49	-18 -54	-20 -60
h5	0 -4	0 -5	0 -6	0 -8	0 -9	0 -11	0 -13	0 -15	0 -18	0 -20	0 -23	0 -25	0 -27
h6	0 -6	0 -8	0 -9	0 -11	0 -13	0 -16	0 -19	0 -22	0 -25	0 -29	0 -32	0 -36	0 -40
h7	0 -10	0 -12	0 -15	0 -18	0 -21	0 -25	0 -30	0 -35	0 -40	0 -46	0 -52	0 -57	0 -63
j6	+4 -2	+6 -2	+7 -2	+8 -3	+9 -4	+11 -5	+12 -7	+13 -9	+14 -11	+16 -13	+16 -16	+18 -18	+20 -20
k6	+6 0	+9 +1	+10 +1	+12 +1	+15 +2	+18 +2	+21 +2	+25 +3	+28 +3	+33 +4	+36 +4	+40 +4	+45 +5
m6	+8 +12	+12 +4	+15 +6	+18 +7	+21 +8	+25 +9	+30 +11	+35 +13	+40 +15	+46 +17	+52 +20	+57 +21	+63 +23
p6	+12 +6	+20 +2	+24 +15	+29 +18	+35 +22	+42 +26	+51 +32	+59 +37	+68 +43	+79 +50	+88 +56	+98 +62	+108 +68

Tableau 3-2 : Tableau des ajustements pour l'arbre (en micron)

2. Ajustement dit à alésage (H) avec serrage garanti (Figure 3-2)

Cote nominale 20 mm

H : position de tolérance de l'alésage (alésage normal)

7 : qualité de l'alésage

g : position de tolérance de l'arbre

6 : qualité de l'arbre

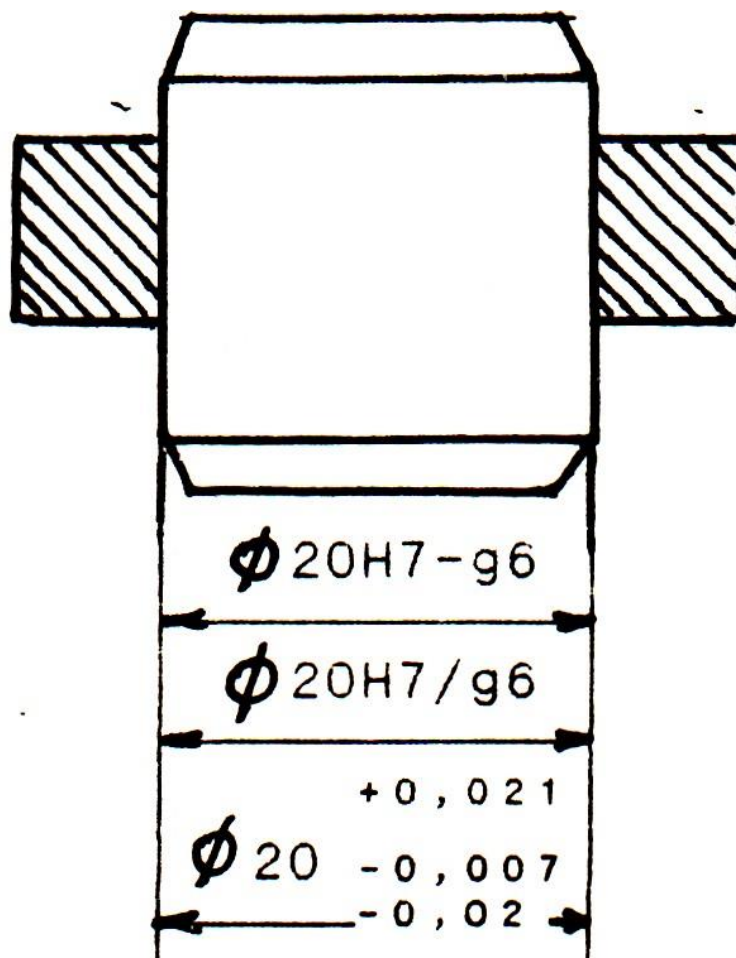


Figure 3-2 : Exemple d'un ajustement entre arbre et alésage

- Tolérance générale

Dans certains cas, les cotes semblent ne pas avoir de tolérance. Une tolérance générale doit donc figurer dans le cartouche (tableau en bas à droite du dessin de définition de chaque pièce).

Exemple :

Tolérance générale $\pm 0,1$: toutes les cotes ont cette tolérance si aucune n'est inscrite

3.2.2.2. Spécifications géométriques

Les dimensions d'une pièce sont toujours affectées de tolérances dimensionnelles. On définit ainsi deux limites, respectivement au maximum et au minimum de matière. Toute pièce réalisée entre ces deux limites sera acceptée par les appareils de contrôle. Cela étant, une réalisation n'est jamais parfaite. A cet effet, la pièce doit satisfaire également à d'autres exigences géométriques pour palier aux défauts de forme et de position car ils influent sur le contact entre les pièces.

Selon l'aspect géométrique d'une pièce, les défauts de forme concernent une seule propriété telle que:

- la planéité
- la rectitude d'un axe
- la rectitude d'une ligne
- la cylindricité
- la circularité

Tandis que les défauts de position concernent une relation entre deux éléments géométriques de la pièce:

- l'inclinaison entre deux faces planes
- le parallélisme de deux faces
- la perpendicularité d'une face et d'un axe
- la coaxialité de deux cylindres
- la symétrie par rapport à un plan
- la position relative de deux trous

On trouvera ci-après les tolérances de forme et de position que l'on rencontre le plus souvent, présentées à l'aide d'exemples facilement adaptables à d'autres cas de figures. Sur chaque dessin, il est représenté le signe conventionnel traduisant le type de tolérance à respecter.

1. Tolérances de forme






					
Profil d'une surface	Profil d'une ligne	Planéité	Rectitude	Cylindricité	Circularité

Tableau 3-3 : Tableau des tolérances de forme

Exemple	Illustration de la tolérance	Application
<p>Rectitude</p> <p>Une ligne quelconque du plan suivant la direction donnée, doit être comprise entre deux droites parallèles distantes de 0,02. Pour une ligne convexe, les droites sont orientées pour que la valeur h soit minimale.</p>		
<p>Planéité</p> <p>Une partie quelconque de la surface, sur une longueur de 80, doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05. Orientation des plans : voir rectitude.</p>		
<p>Circularité</p> <p>Le profil de chaque section droite doit être compris entre deux cercles coplanaires concentriques dont les rayons diffèrent de 0,02. Le cercle intérieur est le plus grand cercle inscrit.</p>		
<p>Cylindricité</p> <p>La surface doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05. Le cylindre extérieur est le plus petit cylindre circonscrit.</p>		

Figure 3-3 : Exemples sur les tolérances de forme

2. Tolérances de position

Localisation	Coaxialité* Concentricité**	Symétrie
Parallélisme	Perpendicularité	Inclinaison

Tableau 3-4 : Tableau des tolérances de position

Exemple	Illustration de la tolérance	Application
<p>Parallélisme</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et parallèles au plan de référence A.</p>		
<p>Perpendicularité</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et perpendiculaires au plan de référence A.</p>		
<p>Inclinaison</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,08 et inclinés de 45° par rapport à l'axe du cylindre de référence A.</p>		
<p>Localisation 2</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et disposés symétriquement par rapport à la position théorique exacte. A : référence primaire (plan). B : référence secondaire (axe d'un cylindre court).</p>		
<p>Coaxialité</p> <p>L'axe du cylindre $\varnothing 24$ h8 doit être compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0,02$ coaxiale à l'axe du cylindre de référence $\varnothing 18$ h6.</p>		

Figure 3-4 : Exemples sur les tolérances de position

3.2.2.3. Spécifications d'état de surface

En plus des spécifications de la cotation, il existe les spécifications d'état de surface. Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs admissibles dans la fabrication. Il faut distinguer entre les surfaces nominales ayant la forme idéale sans irrégularités des formes et sans aspérités des surfaces et les surfaces réelles.

Les défauts de surface ne dépendent pas des cotes d'une pièce à usiner mais du procédé d'usinage. Parmi ces défauts on a :

- l'ondulation
- la rugosité
- L : Longueur d'onde
- H : Hauteur d'onde
- h : hauteur de rugosité

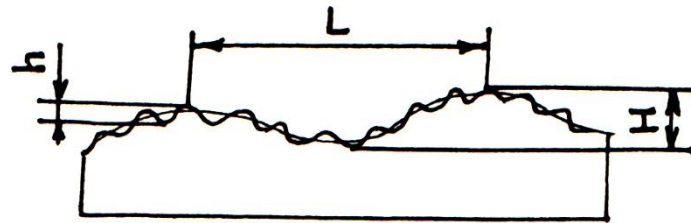


Figure 3-5 : Représentation de l'ondulation et de la rugosité d'une surface

Si :

$L/H = 50$ à 1000 on a une ondulation

$L/H < 50$ on a une rugosité

La rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surface de très petites amplitudes ou défauts micro géométriques (Figure 3-5).

Indication de la rugosité

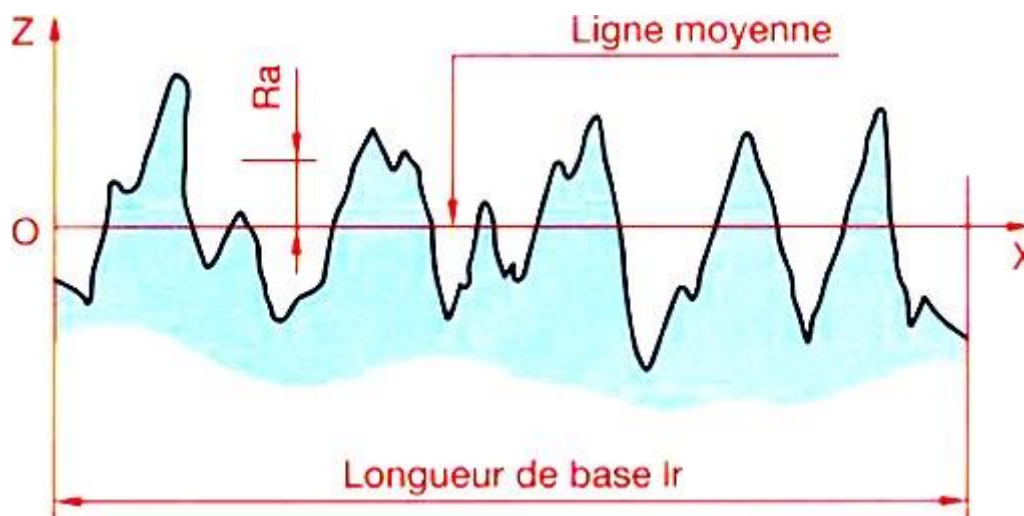
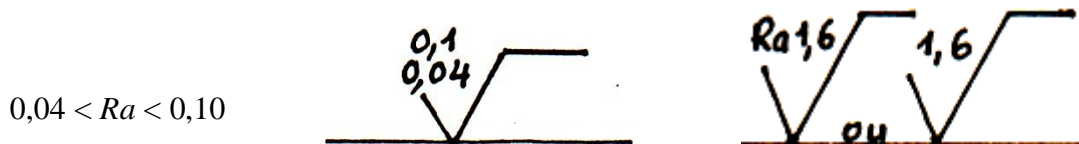


Figure 3-6 : Caractéristiques d'un état de surface

La rugosité est symbolisée par $\sqrt{\quad}$ et Ra l'écart moyen arithmétique du profil qui se calcul comme suit :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l z(x) dx \approx \frac{z_1 + \dots + z_n}{n}$$

Ce signe doit être porté sur la ligne représentative de la surface ou sur son prolongement. A l'intérieur du signe, on inscrit la valeur en microns de la cire de rugosité retenu choisi comme limite admissible.



3.3. Méthodes de mesure et de contrôle

3.3.1. Contrôle direct des dimensions

La mesure directe permet de lire directement la valeur de la dimension à l'aide d'instrument portant une graduation (règle graduée, pied-à-coulisse, micromètre, ...).

3.3.1.1. Calibre à coulisse (Pied à coulisse)

Cet appareil de mesure directe, entièrement en acier inoxydable, peut être de dimensions et d'utilisations variables, en fonction de sa longueur et de la forme de ses becs (Figure 3-7). Certaines versions très modernes possèdent un cadran facilitant la lecture. Cet appareil utilise le principe de la règle graduée munie d'un bec transversal (le Pied) formant butée fixe et du vernier formant butée mobile (coulisseau se déplaçant sur la règle).

Précision de mesures

Si la règle est toujours graduée en mm, il n'en est pas de même pour le vernier. Celui-ci, gravé sur le coulisseau, a une graduation particulière dont le nombre de divisions va déterminer la précision de lecture du calibre à coulisse.

- ❖ Le **Vernier au 1/10^{ème}** possède 10 graduations égales, et mesure 9 mm. 1 graduation = 0,9 mm.
 - Précision du 1/10^{ème} = 0.1 mm
- ❖ Le **Vernier au 1/20^{ème}** possède 20 graduations égales, et mesure 19 mm. 1 graduation = 0,95 mm
 - Précision du 1/20^{ème} = 0.05 mm
- ❖ Le **Vernier au 1/50^{ème}** possède 50 graduations égales, et mesure 49 mm. 1 graduation = 0,98 mm.
 - Précision du 1/50^{ème} = 0.02 mm

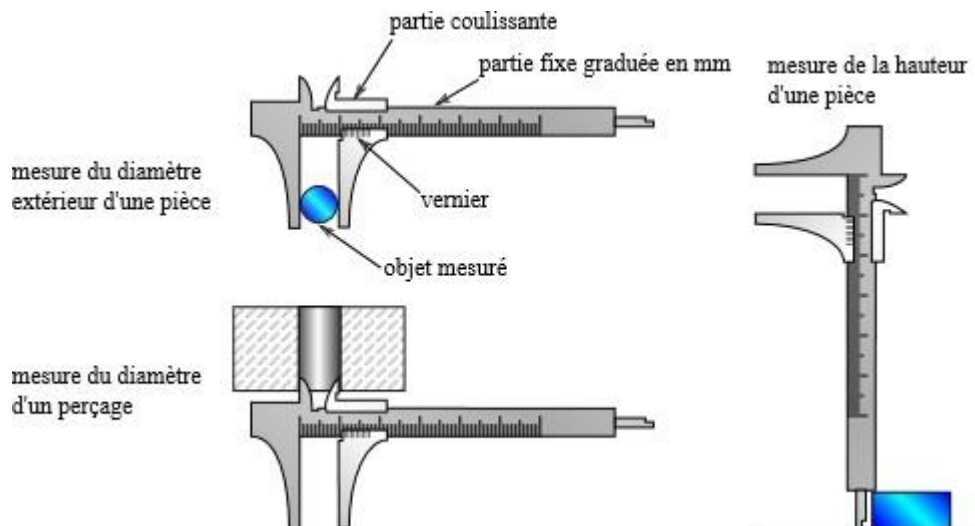
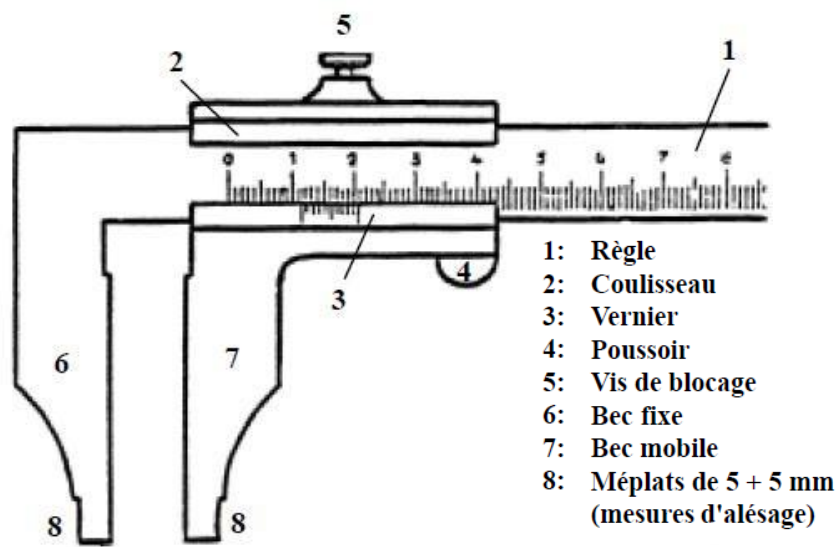
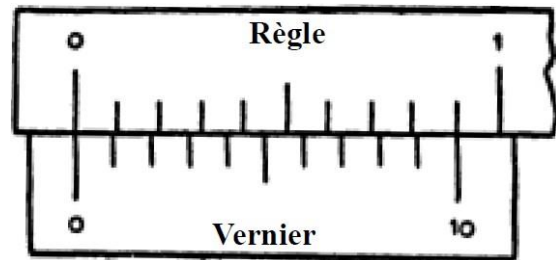


Figure 3-7 : Pied à coulisse, ses composants et façon de mesure

Méthode générale de lecture

1. Lire le nombre entier en mm, à gauche du zéro du vernier.
2. Localiser la graduation du vernier (une seule possibilité) qui coïncide avec une graduation quelconque de la règle
3. Ajouter les millimètres, les $1/10^{\text{ème}}$, $1/20^{\text{ème}}$ ou $1/50^{\text{ème}}$, selon les cas, pour obtenir la mesure exacte.

Exemple : Le vernier au $1/10^{\text{ème}}$
Le vernier mesure 9 mm.
Il est divisé en 10 parties égales.
Chaque partie mesure $9/10^{\text{e}}$ mm.
La précision de lecture est de 0,1 mm.



Catégories de pied à coulisse

En métrologie, on distingue 3 types de pieds à coulisse :

- Les pieds à coulisse à vernier. Le vernier permet de lire les fractions de division. Les résolutions les plus courantes sont : $1/10^{\text{ème}}$, $1/20^{\text{ème}}$ ou $1/50^{\text{ème}}$ de mm. Le vernier complète donc la règle graduée en apportant une exactitude dans la mesure.



Figure 3-8 : Pied à coulisse à vernier

- Les pieds à coulisse à montre. Ils sont dotés d'un cadran circulaire gradué avec une aiguille. Différentes résolutions existent : 0,05 - 0,02 ou encore 0,01 mm.

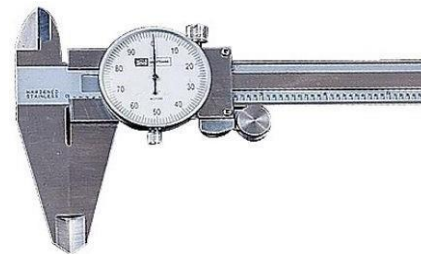


Figure 3-9 : Pied à coulisse à montre

- Les pieds à coulisse à lecture digitale. Pour un affichage rapide dans un écran à cristaux liquides. Ils peuvent avoir différentes fonctions : conversion des millimètres en pouces (inch), blocage de l'affichage, conservation des mesures en mémoire, transmission des données vers un ordinateur (grâce à une sortie de données).



Figure 3-10 : Pied à coulisse à lecture digitale

Pied de profondeur

Cet appareil est une variante du calibre à coulisse. Il permet la mesure des profondeurs et la méthode de lecture utilisée est strictement identique au calibre à coulisse.

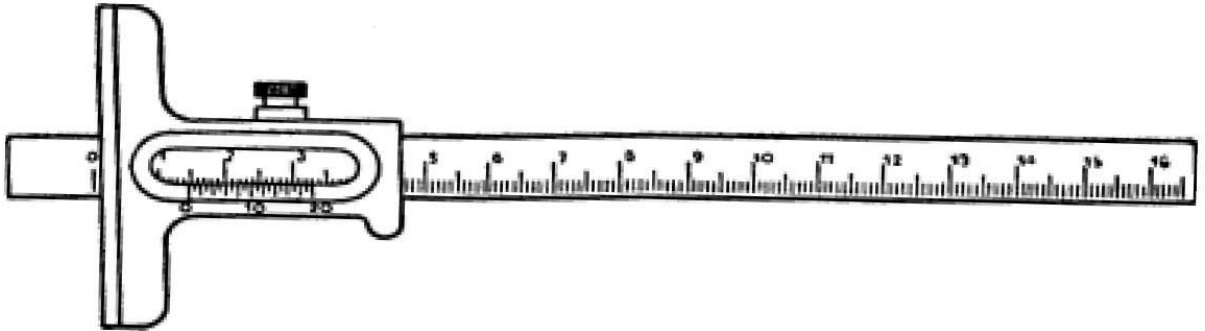
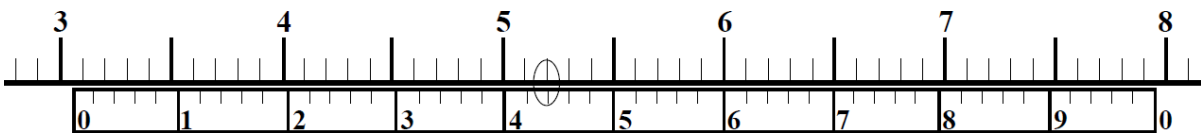
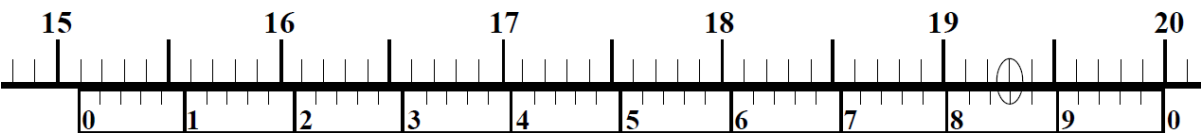


Figure 3-11 : Pied de profondeur

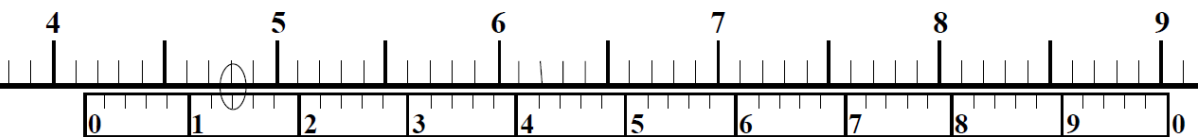
Exercices de lecture



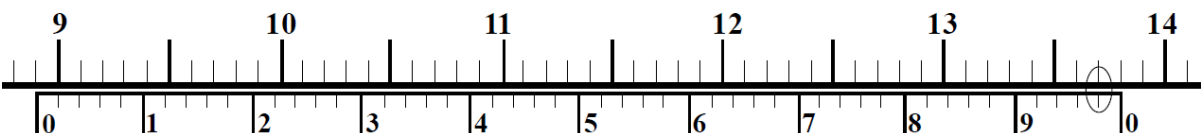
Lecture :



Lecture :



Lecture :



Lecture :

3.3.1.2. Micromètre (Palmer)

Le micromètre (Figure 3-12) est un instrument beaucoup plus précis que le calibre à coulisse. Grâce à la touche mobile à vis micrométrique au pas de 0,5 mm, la précision de lecture est de $1/100^{\text{ème}}$ de mm. D'autre part :

- Les erreurs résultant de l'inégalité de pression de l'appareil sur les pièces à mesurer se trouvent éliminées par le système de friction.
- Les déformations de l'appareil sont négligeables, le corps pouvant avoir une section suffisante pour rendre toute flexion impossible.
- Les incertitudes de lecture sont très faibles, puisqu'une variation de cote de $1/100^{\text{e}}$ de mm nécessite la rotation de la douille de la valeur d'une division, équivalent environ à 1 mm en longueur développée.

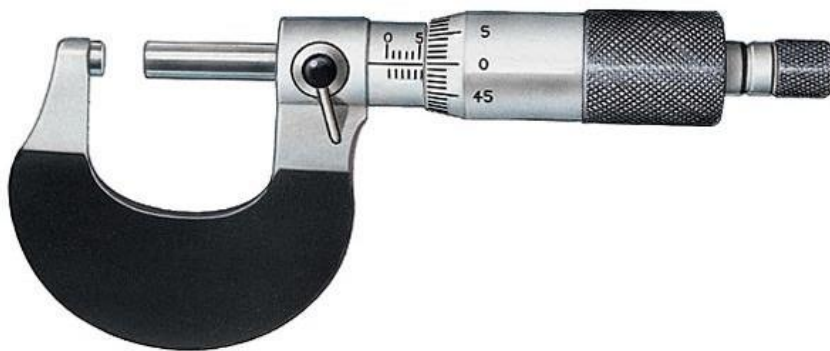


Figure 3-12 : Micromètre (palmer)

Constitution

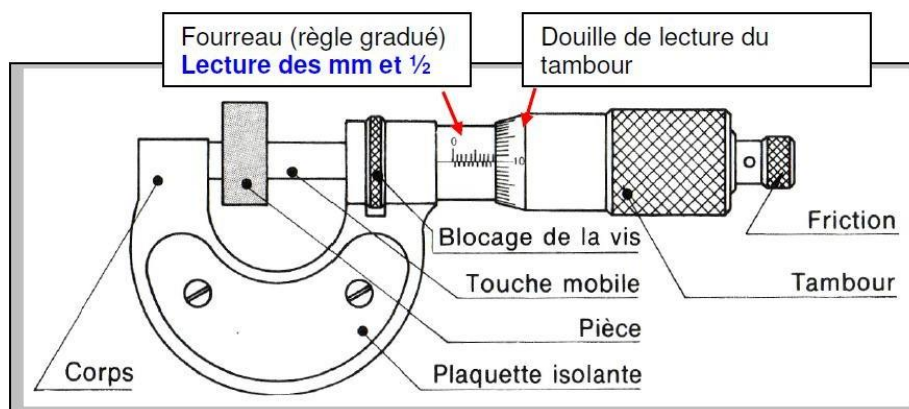


Figure 3-13 : Constitution d'un micromètre

Il se compose :

- La partie en U ou demi-circulaire possédant une touche fixe et une touche mobile actionné par un tambour.
- La partie cylindrique (fourreau) dont la génératrice est graduée en millimètre, voire en $\frac{1}{2}$ mm
- D'un tambour composé d'une vis micrométrique en acier traitée et rectifiée ;
- La douille de lecture comportant 50 divisions sur sa circonférence (lecture au $\frac{1}{100}$ è)
- Le bouton de friction qui permet de manœuvrer le micromètre sans le détériorer.
- Le système d'étalonnage (vis de réglage).

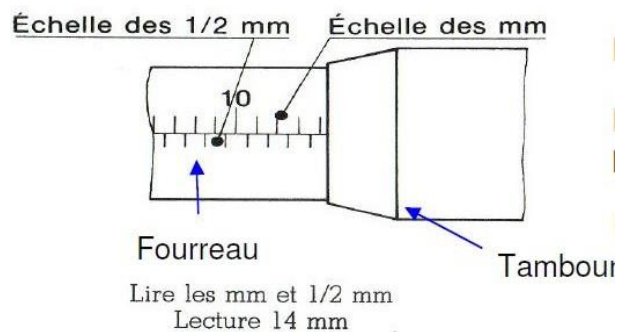
Principe de lecture

1^{ère} étape : la lecture des millimètres

La lecture des mm s'effectue sur le fourreau.

La limite côté gauche du tambour gradué est proche de l'échelle des mm.

Dans le cas ci contre la lecture est de 14 mm



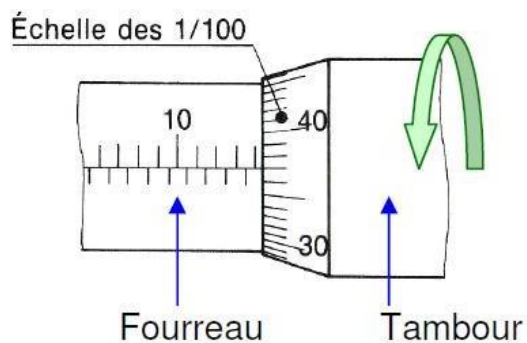
2^{ème} étape : la lecture des $\frac{1}{100}$ ^{ème} de mm (0.01mm)

La lecture des $\frac{1}{100}$ de mm s'effectue sur le tambour gradué.

Le relevé de l'échelle des $\frac{1}{100}$ doit être le trait du tambour gradué qui correspond à l'axe de l'échelle des mm.

Le sens de lecture du tambour gradué est dans le sens contraire des aiguilles d'une montre

Dans ce cas la lecture est de $14 + 0,37 = 14,37$ mm



Exemple :

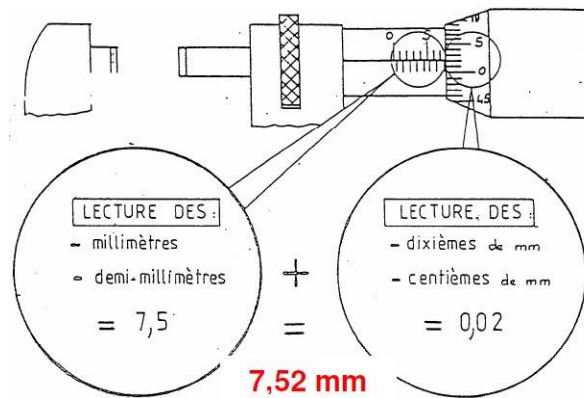


Figure 3-14 : Exemple de lecture dans un micromètre

Catégories de micromètre

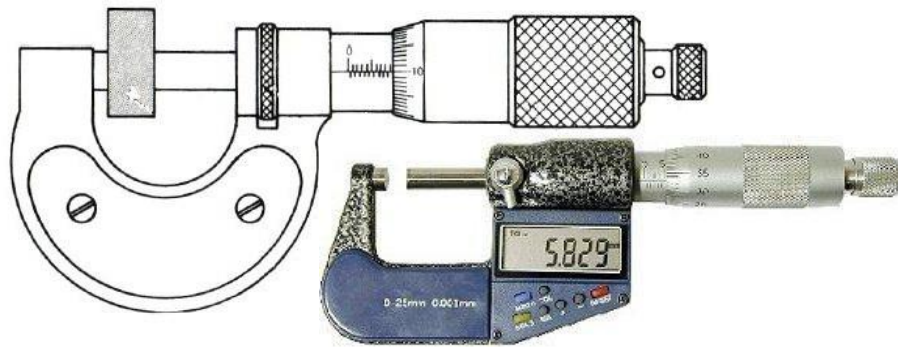


Figure 3-15 : Micromètre universel

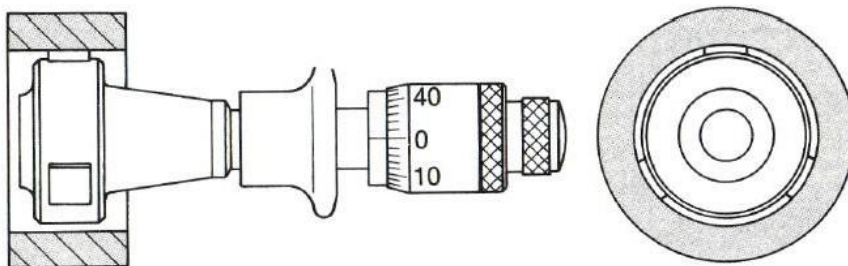


Figure 3-16 : Micromètre d'intérieur à trois touches

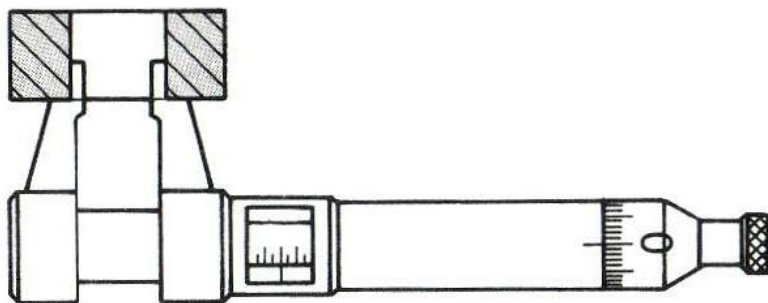


Figure 3-17 : Micromètre d'intérieur à becs

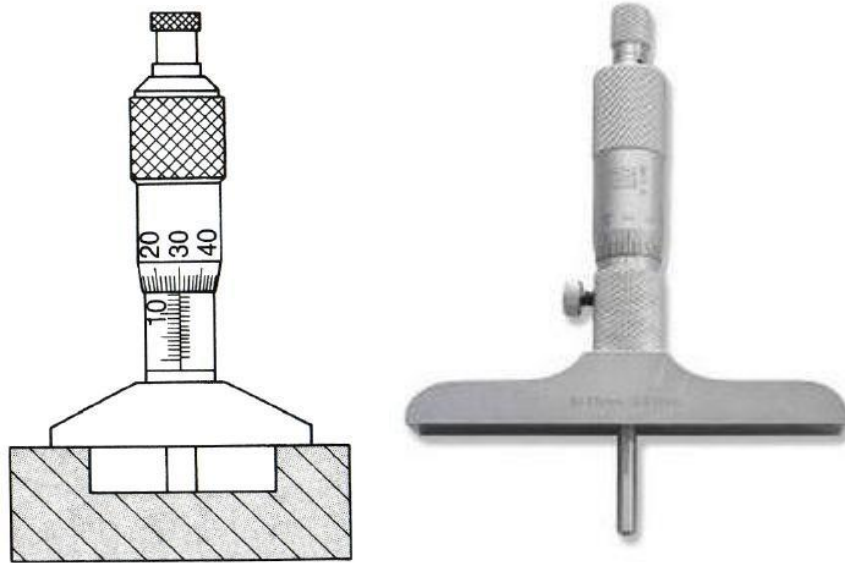
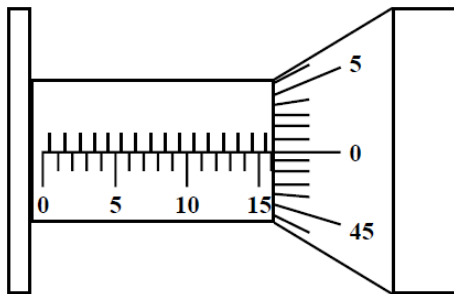
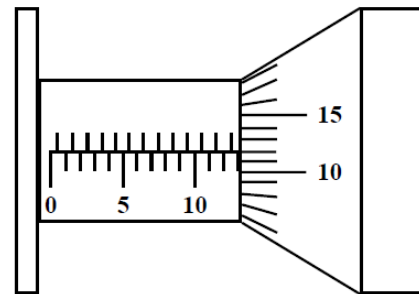


Figure 3-18 : Jauge de profondeur micrométrique

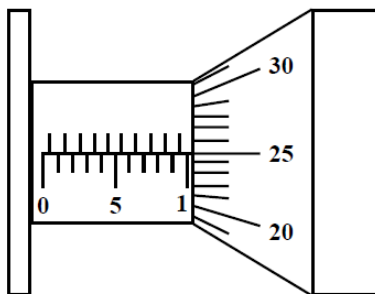
Exercices de lecture



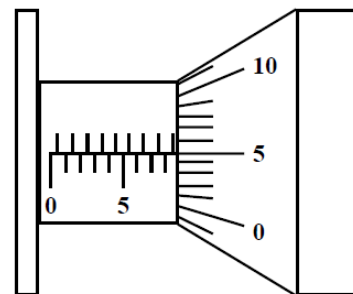
Lecture :



Lecture :



Lecture :



Lecture :

3.3.2. Contrôle indirect ou par comparaison

La grandeur à mesurer est comparée à une grandeur de même nature, de valeur connue, peu différente de celle de la grandeur à mesurer. On distingue deux méthodes :

- Mesure par comparaison (ex : comparateurs ...)
- Mesure par calibrage (ex : calibres à mâchoires, tampons ...)

3.3.2.1. Comparateurs

Généralités

Les comparateurs ou amplificateurs (Figure 3-19) enregistrent les différences de cotes entre les différents points d'une pièce ou entre les pièces à mesurer et les étalons (pièces types ou combinaison de cales). La précision et la sensibilité de ces appareils dépend pour beaucoup de la constance et du peu d'intensité de la pression qu'exerce leur touche mobile sur la pièce à mesurer. Nous nous limiterons au comparateur à amplification mécanique.



Figure 3-19 : Comparateur

Description et Lecture

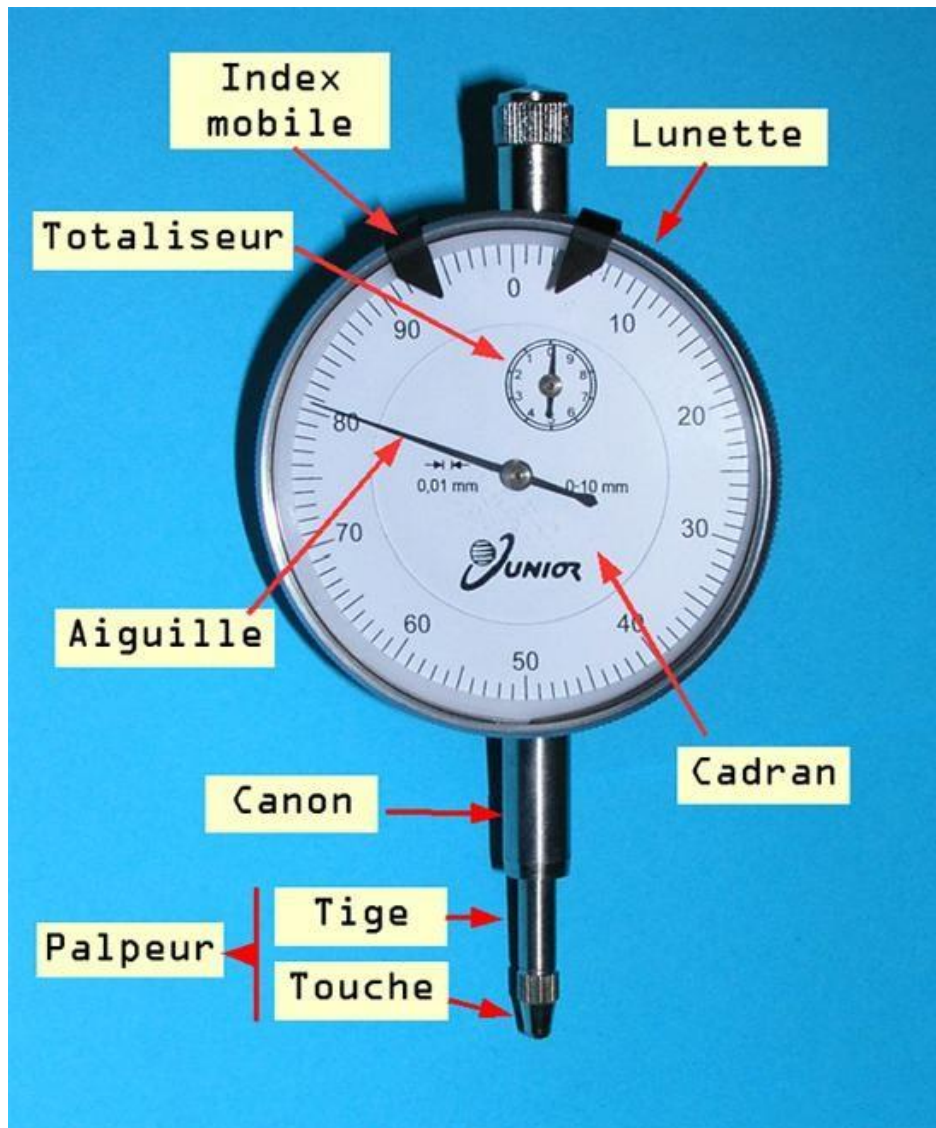


Figure 3-20 : Composantes d'un comparateur

Le comparateur à cadran est constitué de :

- La grande aiguille, commandée par le palpeur fait un tour pour une différence de cote de 1 mm.
- Le grand cadran est divisé en 100 parties égales, il est donc possible d'apprécier le 1/100^{ème} de mm.
- Le petit cadran (totaliseur) indique le nombre de tours de la grande aiguille.
- L'ensemble de la grande graduation (lunette) peut tourner autour de l'axe de la montre, afin que la division "zéro" puisse être mise à volonté devant l'aiguille centrale.

Il existe également des comparateurs à cadran permettant d'apprécier le 1/1000^{ème} de mm.

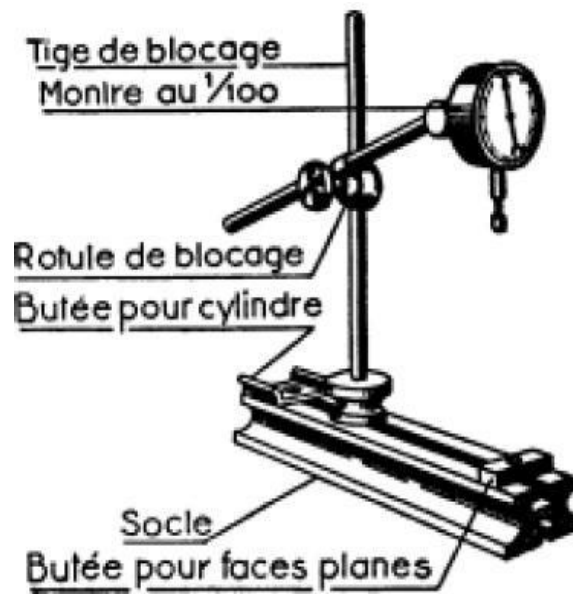


Figure 3-21 : Support du comparateur

Exemple d'utilisation (mesure d'un écart de parallélisme)

Pour mesurer un écart de parallélisme, la surface de référence de la pièce est posée sur une surface plane. Le comparateur est monté de manière fixe sur un support dont le socle est également sur la surface plane. Le comparateur est posé sur un point de la pièce dont il faut mesurer le parallélisme par rapport à la surface de référence. Pour effectuer la mesure, il faut faire avancer le comparateur sur son socle en laissant la pièce immobile ou la pièce en laissant le comparateur immobile.

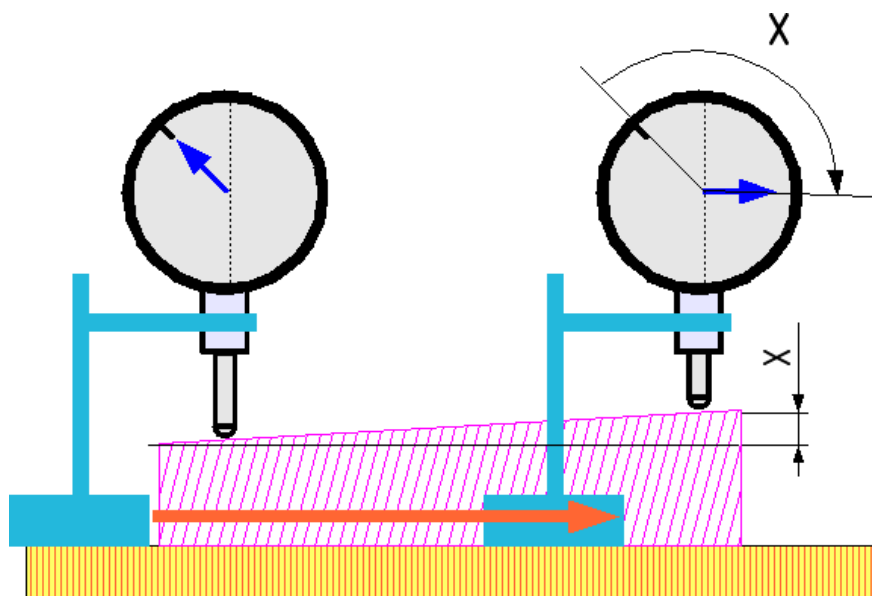
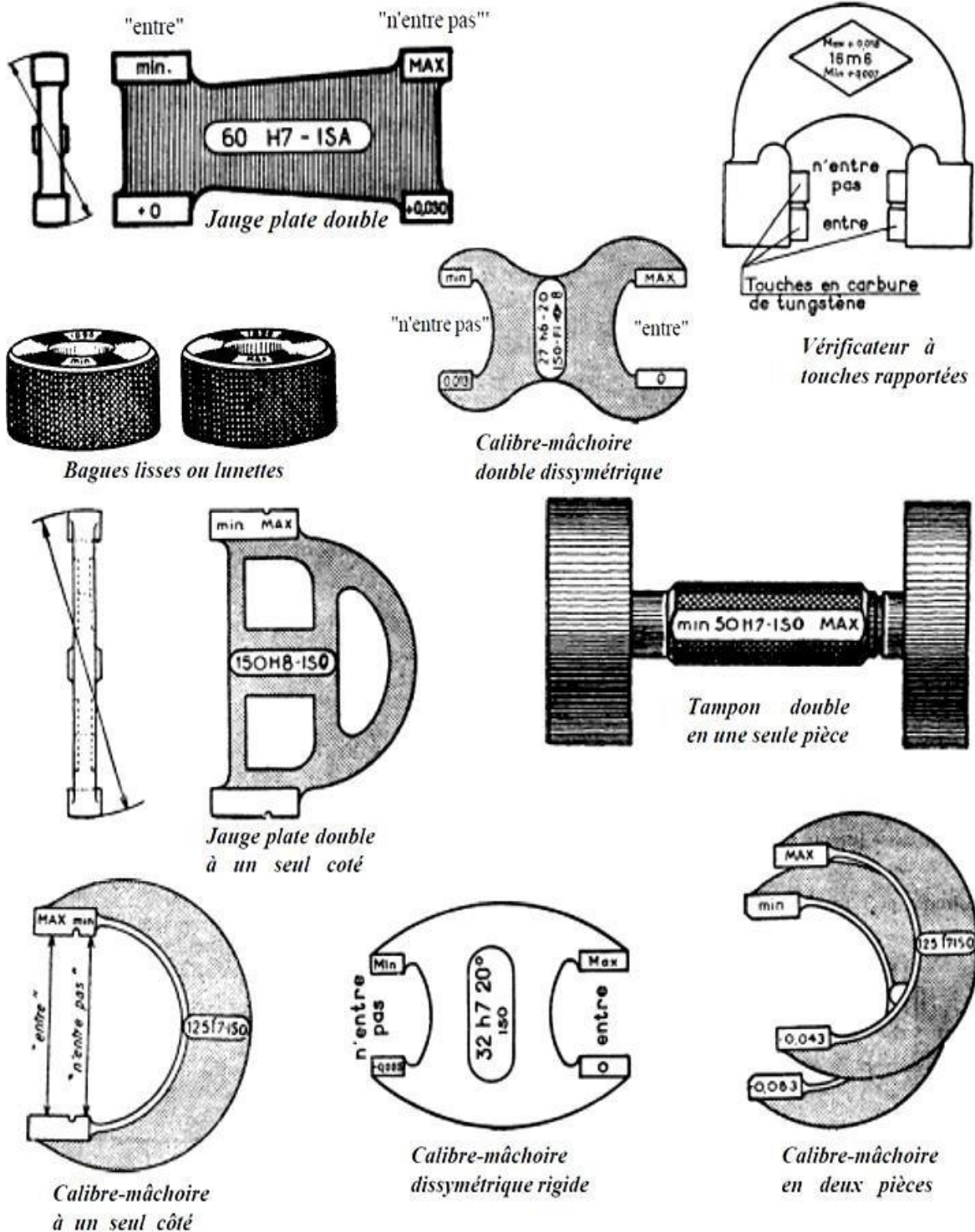


Figure 3-22 : Principe de mesure d'un écart de rectitude avec un comparateur

3.3.2.2. Vérificateurs à tolérances

Les vérificateurs à tolérance (Figure 3-23) sont employés pour s'assurer que les cotes des pièces exécutées sont bien comprises entre les tolérances prévues sur le dessin de définition. La vérification des tolérances dimensionnelles des pièces mécaniques est basée sur le principe « La pièce "entre" ou "n'entre pas" ».



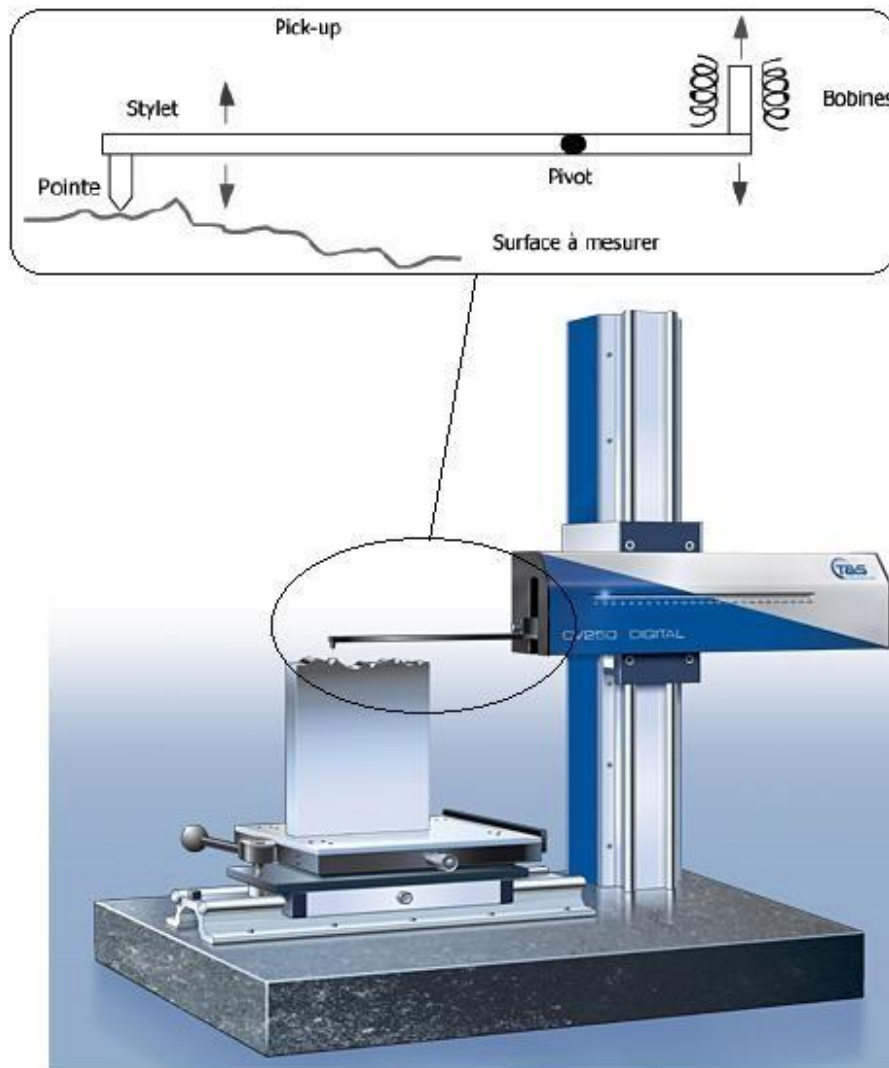


Figure 3-24 : Profilomètre

3.3.4. Étalonnage

3.3.4.1. Étalonnage, vérification et ajustage d'un équipement de mesure

D'après le **Vocabulaire international de métrologie (VIM)** édition 2008, l'étalonnage est une « opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir un résultat de mesure à partir d'une indication ».

En clair, cette opération consiste à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

La seconde étape dont parle le VIM, consiste à exploiter les résultats de la première. Il peut s'agir de trois actions :

- la correction « manuelle » du résultat lu ;
- la vérification du matériel ;
- l'ajustage du matériel.

La **correction** « **manuelle** » consiste à modifier la valeur lue.

La **vérification métrologique** consiste à apporter la preuve à partir de mesures (étalonnage) que des exigences spécifiées, c'est-à-dire les erreurs maximales tolérées (EMT), sont satisfaites. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de conformité (suivie d'une remise en service) ou de non-conformité (suivie d'un ajustage, d'une réparation, d'un déclassement ou d'une réforme de l'appareil).

L'**ajustage** est un « ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer ».

On s'intéresse à l'**étalonnage** comme une action qui permet :

- le **réglage** des instruments de mesure tels que : pieds à coulisse, micromètres, comparateur, etc (Figure 3-25).
- l'analyse de la **répétabilité** des résultats de mesures, ou la comparaison avec des données déjà obtenues.

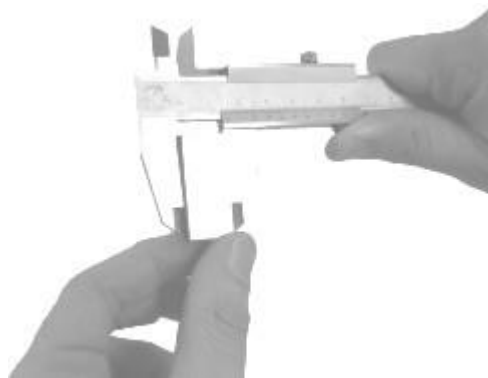


Figure 3-25 : Réglage d'un pied à coulisse

3.3.4.2. Étalons

« Un étalon est une réalisation de la définition d'une grandeur donnée, avec une valeur déterminée et une incertitude de mesure associée, utilisée comme référence ».



Figure 3-26 : Etalons

Pour simplifier, un étalon est une matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude (Figure 3-26). Un étalon sert à étalonner des instruments qui mesurent la même grandeur.