

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie



جامعة جيلالي بونعاما خميس مليانة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم التكنولوجيا

Matière :
MÉTROLOGIE



Objectifs de l'enseignement :

Apprendre à l'étudiant les critères de précision de fabrication et d'assemblage des pièces ; connaître et savoir choisir, dans différents cas, les méthodes et moyens de contrôle et de mesures des dimensions et des défauts de fabrication des pièces mécaniques.

Contenu de la matière :

1. Généralités sur la métrologie
2. Système international de mesure SI
3. Mesure et contrôle
4. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

Mode d'évaluation :

Une note d'examen final en fin de semestre

Enseignant :
I. ZIDANE

Table des matières

Chapitre 1. Généralités sur la métrologie	1
1.1. Définitions	1
1.2. Vocabulaires métrologiques	1
1.3. Instituts de métrologie et de normalisation	3
Chapitre 2. Système international de mesure SI	4
2.1. Introduction	4
2.2. Unités de bases du SI.....	4
2.3. Unités dérivées	5
2.4. Unités supplémentaires.....	7
2.5. Multiples et sous-multiples.....	8
Chapitre 3. Mesures et contrôles.....	9
3.1. Introduction	9
3.2. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle	9
3.3. Méthodes de mesure et de contrôle	19
Chapitre 4. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesures	35
4.1. Introduction	35
4.2. Erreurs de mesure et incertitude	36
4.3. Quelques lois de probabilité	39
4.4. Evaluation d'une incertitude simple	41
4.5. Conformité des mesures	44
Références bibliographiques	46

Chapitre 1. Généralités sur la métrologie

1.1. Définitions

La métrologie est la science de la mesure. Elle 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 ... 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 :

- 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 (R&D),
- 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.

NB : Sans incertitude les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés :

- soit entre eux.
- soit par rapport à des valeurs de référence spécifiées dans une norme ou une spécification (conformité d'un produit).

1.2. Vocabulaires métrologiques

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).

1.2.1. Grandeur

Caractéristique d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

Sens général : longueur, temps, masse, etc.

Sens appliqué : longueur d'une tige donnée, masse du corps A, durée d'un cycle donné, etc.

1.2.2. Valeur d'une grandeur

Expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre.

Exemple : Longueur d'une tige = 5,12 m, Masse du corps A = 14,58 kg.

1.2.3. Valeur vraie

Valeur compatible avec la définition d'une grandeur particulière donnée. C'est la valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait (sans incertitudes). Autant dire que la valeur vraie est imaginaire. C'est pourquoi le métrologue doit prendre du recul sur la mesure qu'il effectue.

1.2.4. Valeur conventionnellement vraie

Valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, parfois par convention, comme le représentant avec une incertitude appropriée pour un usage donné. Cette valeur est parfois appelée :

- valeur assignée ;
- meilleure estimation ;
- valeur convenue ;
- valeur de référence.

Cette valeur est retranscrite dans le certificat d'étalonnage (le certificat d'étalonnage fait référence à des conditions particulières pour l'étalonnage). C'est cette valeur qui doit ensuite être prise en compte lors des mesures. Il convient de corriger la valeur vraie avec cette valeur conventionnellement vraie.

1.2.5. Mesurande

Grandeur particulière soumise à mesurage. Le mesurande est ce que l'on souhaite mesurer. **Exemple** : Masse du corps A soumis aux conditions du laboratoire X.

1.2.6. Mesurage

Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.

1.2.7. Grandeurs d'influence

Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

Exemples : Température, humidité, pression atmosphérique.

1.3. Instituts de métrologie et de normalisation

1.3.1. Instituts nationaux de métrologie

Allemagne	PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
France	LNE Laboratoire National d'Essais et de Métrologie
Grande Bretagne	NPL (National Physical Laboratory)
Pays-Bas	NMi (Nederlands Meetinstituut)
Suisse	METAS (Métrologie et Accréditation suisses)

1.3.2. Organismes internationaux de métrologie

OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
Metrologia	Revue internationale sur les aspects scientifiques de la métrologie

1.3.3. Instituts de normalisation

INAPI	Institut National de la Propriété Industrielle (qui gère les normes en Algérie)
OANM	Organisation Arabe des Normes et Mesures (dont participent la totalité des pays arabes)
AFNOR	Association Française de Normalisation
CEN	Comité Européen de Normalisation
DIN	Deutsches Institut für Normung
NBN	Bureau de Normalisation - est l'organisme belge responsable de la réalisation et publication des normes en Belgique
ISO	International System Organization

1.3.4. Organismes d'accréditation

BELAC/BELTEST	Organisation Belge d'accréditation
COFRAC	Le portail français de l'accréditation
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
EA	European co-operation for Accreditation
ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation

1.3.5. Autres instituts et organismes de métrologie

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
-------------	---

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 carré 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

Les noms et les symboles des multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse sont formés par l'adjonction de noms de préfixes au mot 'gramme' et de symboles de ces préfixes au symbole de l'unité 'g'.

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).

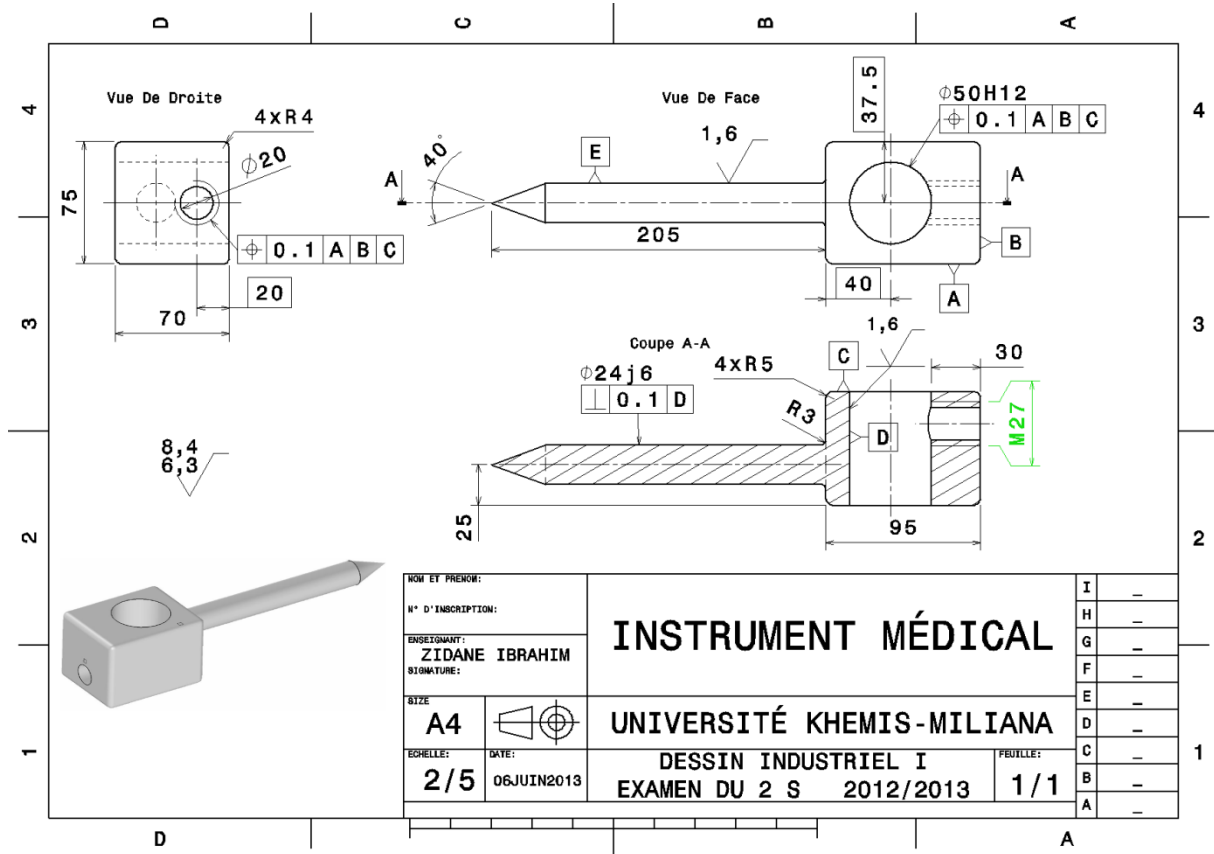


Figure 3-1 : Exemple d'un dessin de définition

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 :

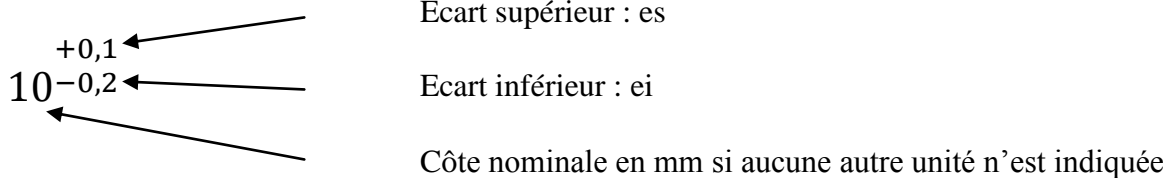
- Spécifications dimensionnelles et angulaires.
- Spécifications géométriques.
- Spécifications d'état de surface.

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. $\emptyset 45 f7$ ou arbre $\emptyset 45 \begin{matrix} -0,025 \\ -0,060 \end{matrix}$

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

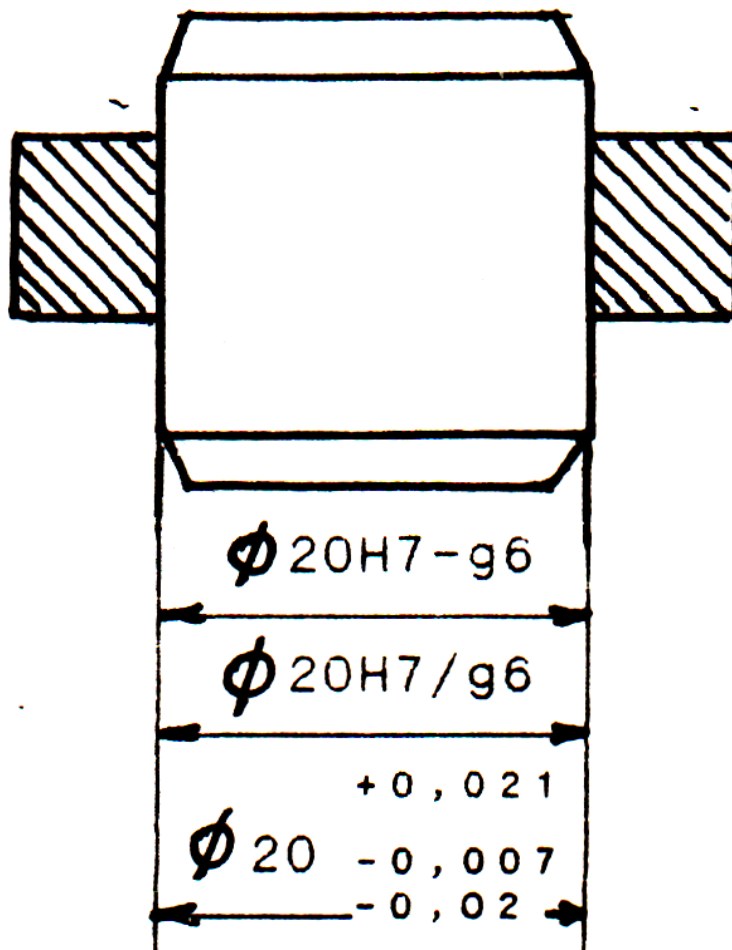


Figure 3-2 : Exemple d'un ajustement entre arbre et alésage

- 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

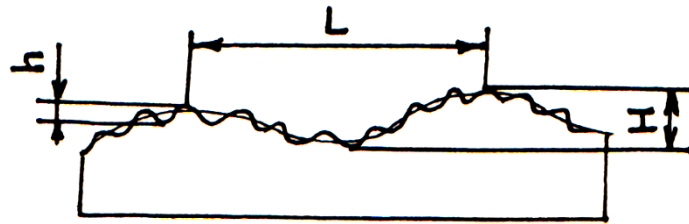


Figure 3-5 : Représentation de l'ondulation et de la rugosité d'une surface

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

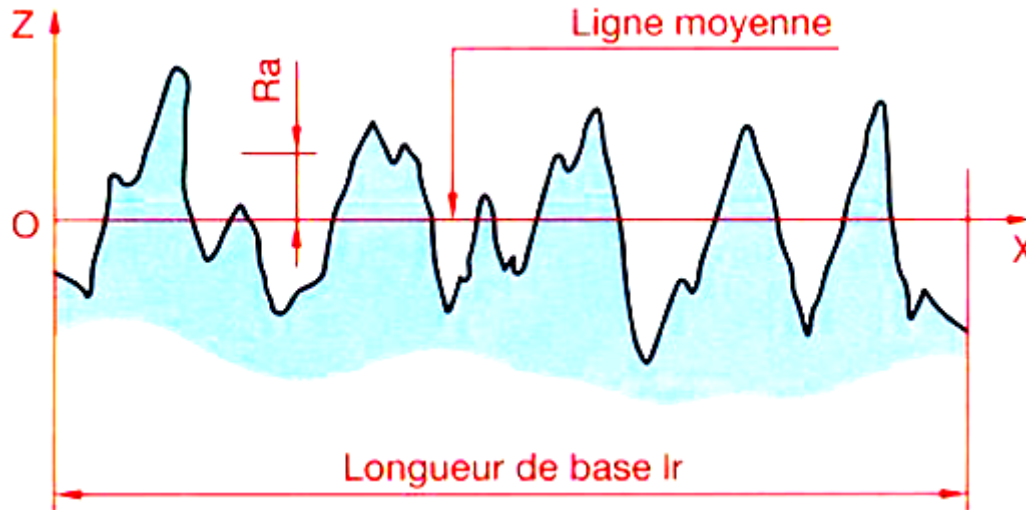
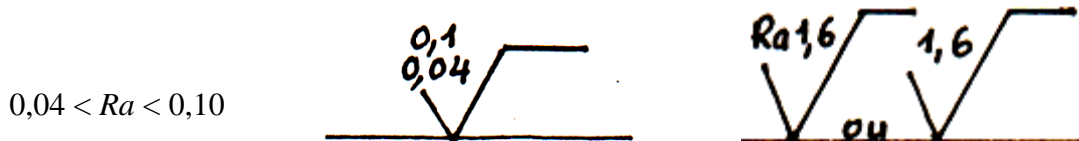


Figure 3-6 : Caractéristiques d'un état de surface

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

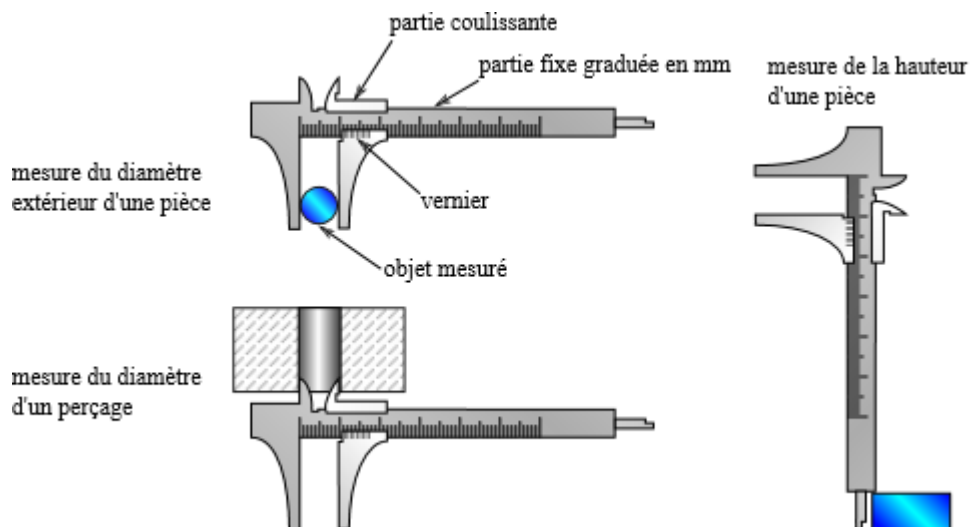
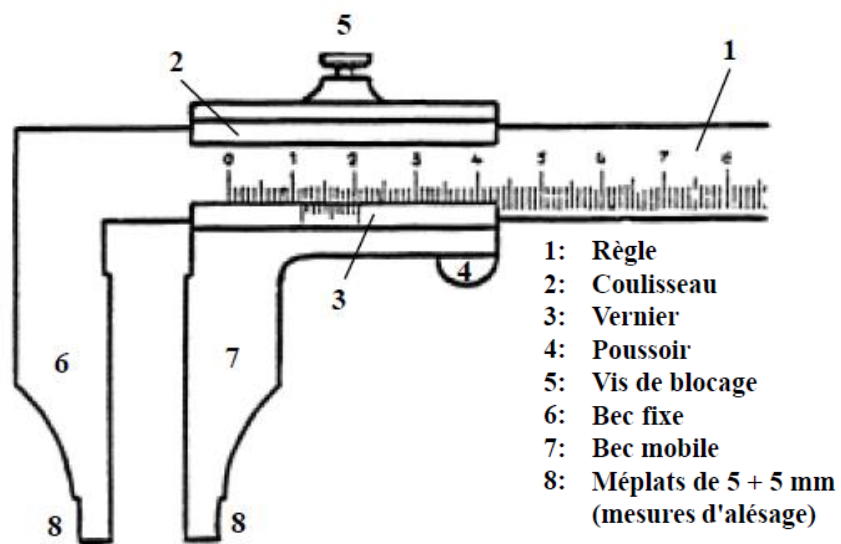
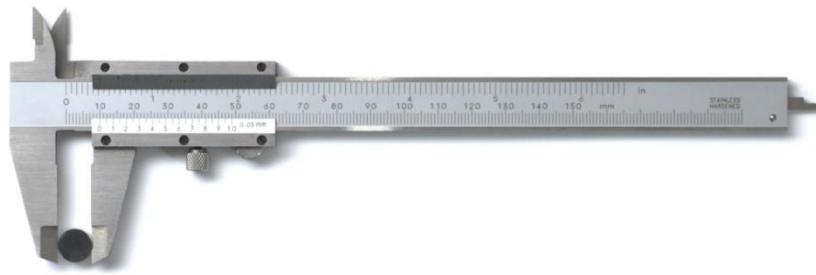
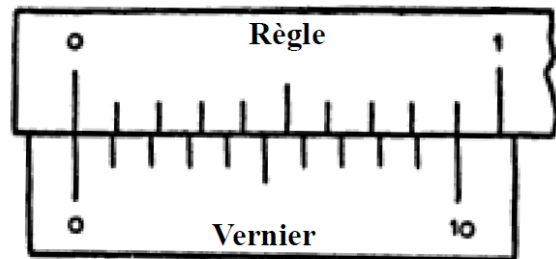


Figure 3-7 : Pied à coulisse, ses composantes et façon de mesure

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 $9/10^{\text{ème}}$ 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.

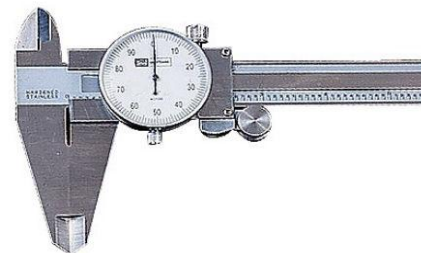


Figure 3-9 : Pied à coulisse à montre

- 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.

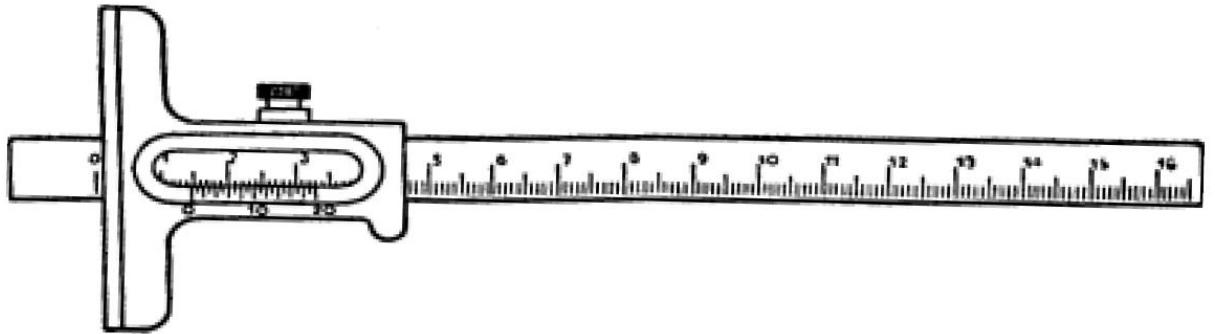
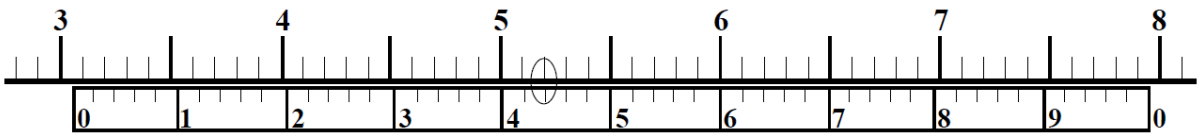
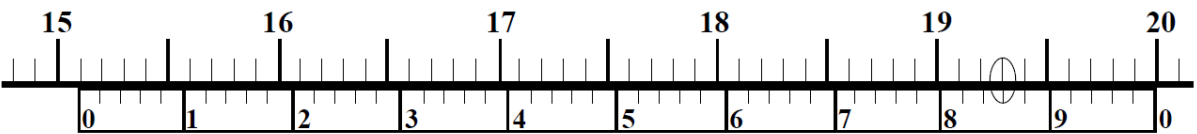


Figure 3-11 : Pied de profondeur

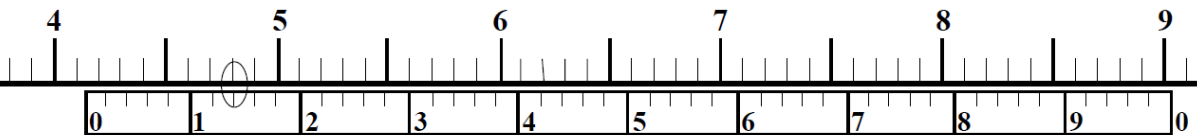
Exercices de lecture



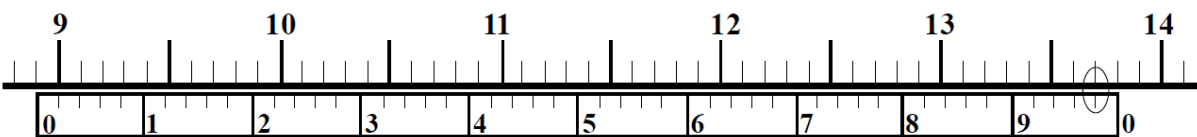
Lecture :



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

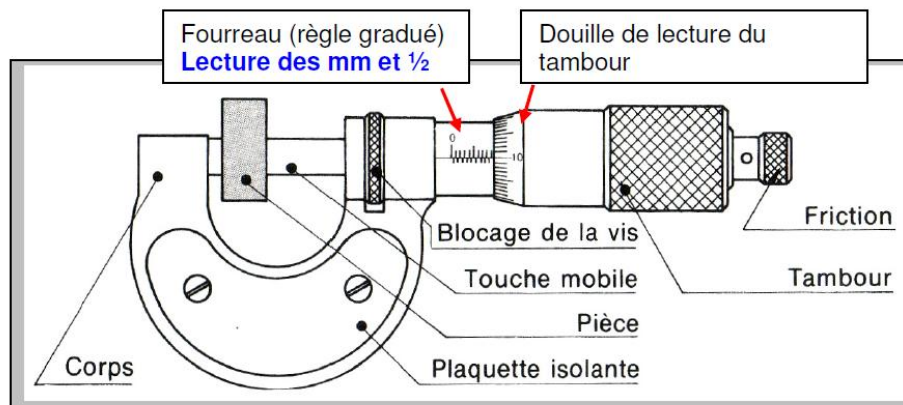


Figure 3-13 : Constitution d'un micromètre

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).

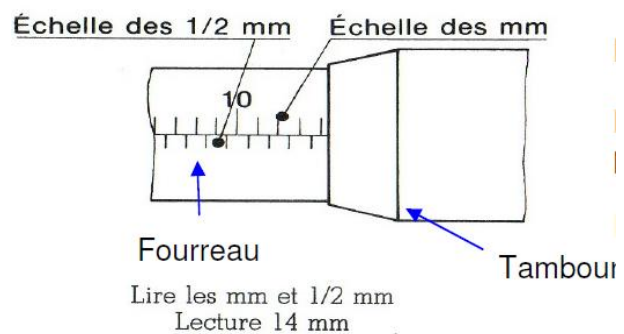
Principe de lecture

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

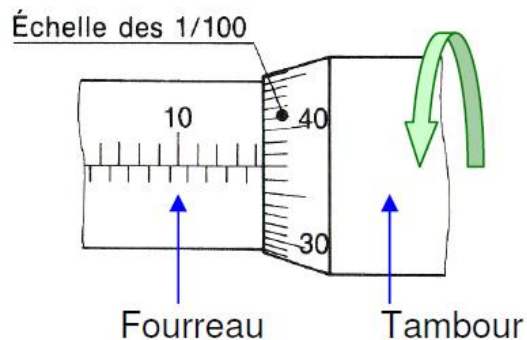


2^{ème} étape : la lecture des $\frac{1}{100}$ ^{ème} de mm (0.01mm)

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 :

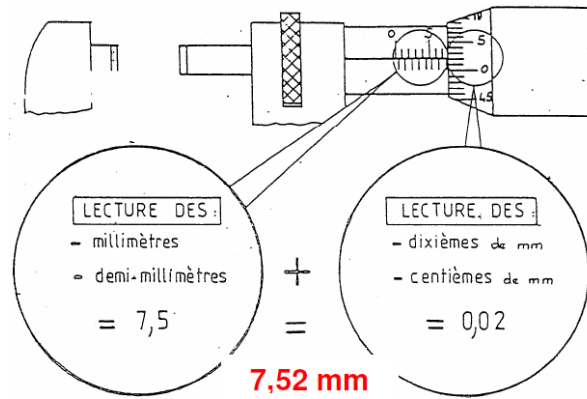


Figure 3-14 : Exemple de lecture dans un micromètre

Catégories de micromètre

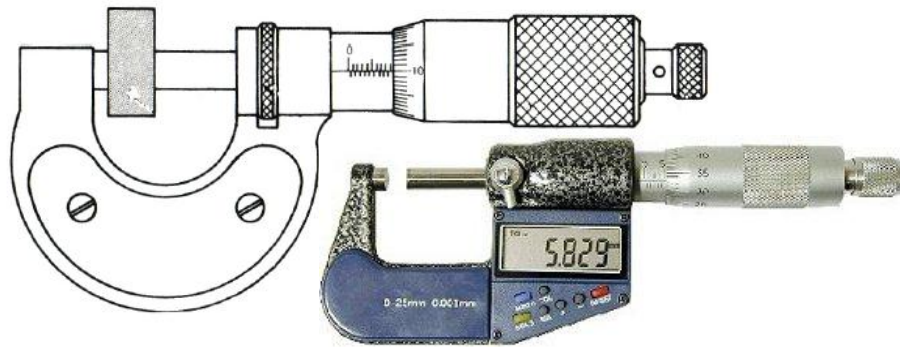


Figure 3-15 : Micromètre universel

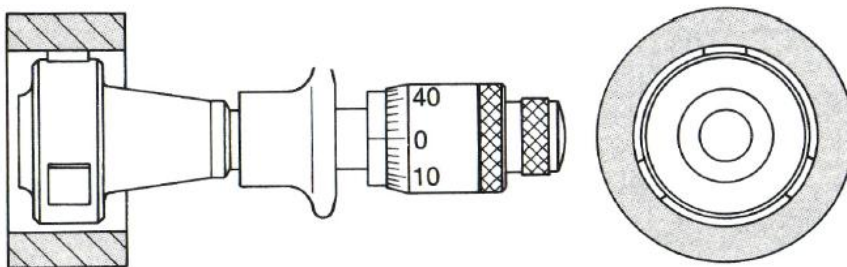


Figure 3-16 : Micromètre d'intérieur à trois touches

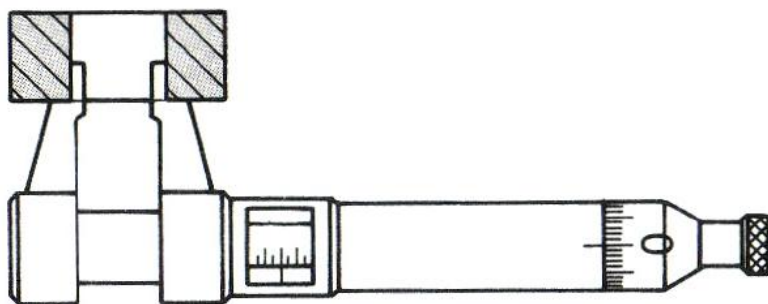


Figure 3-17 : Micromètre d'intérieur à becs

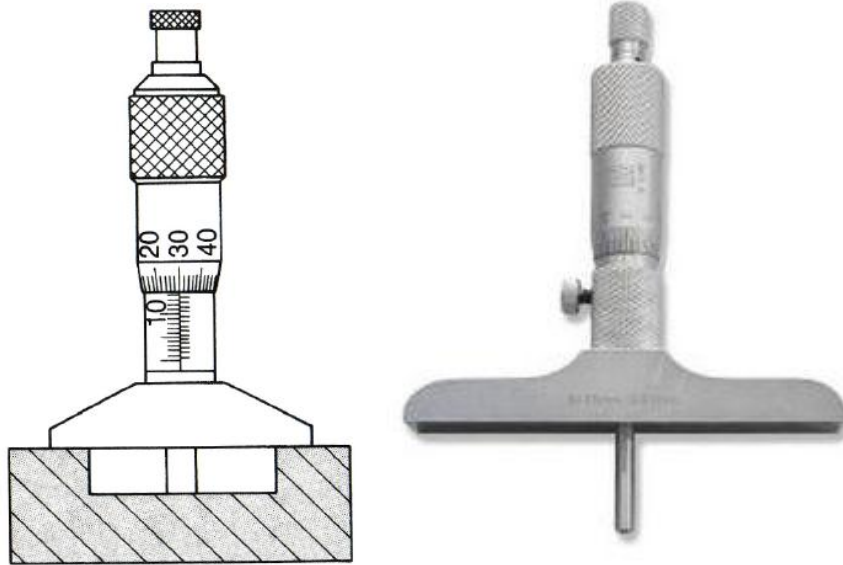
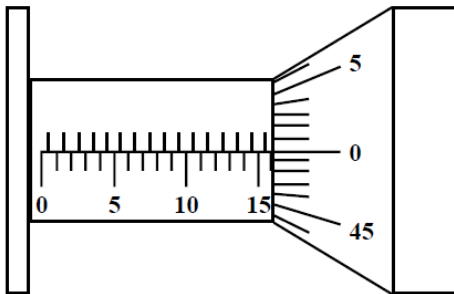
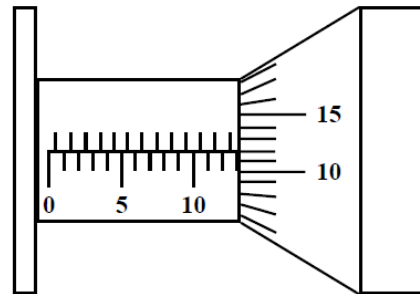


Figure 3-18 : Jauge de profondeur micrométrique

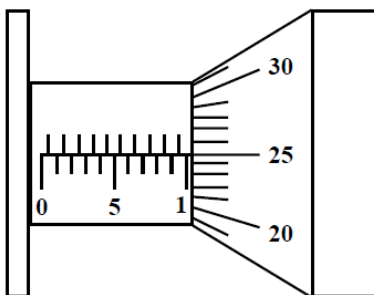
Exercices de lecture



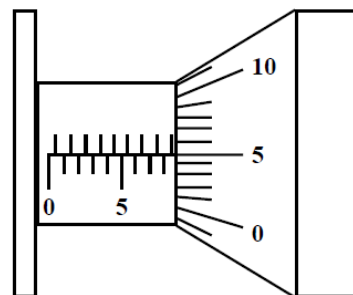
Lecture :



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

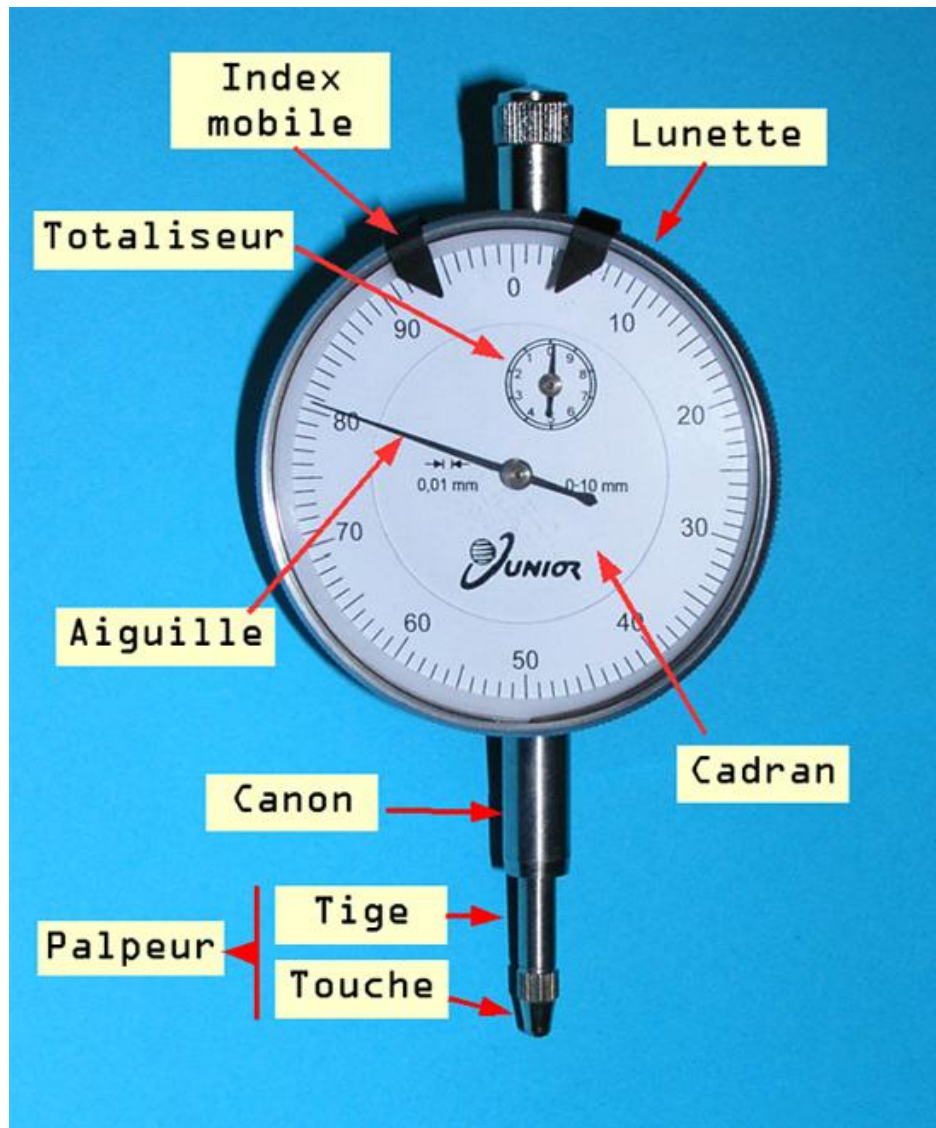


Figure 3-20 : Composantes d'un comparateur

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.

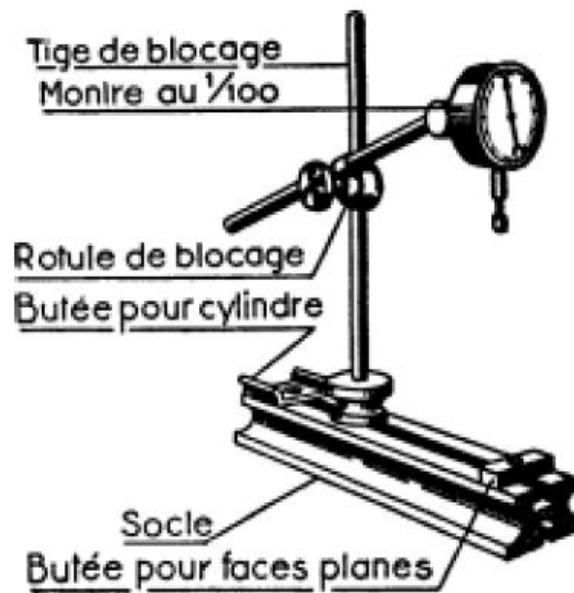


Figure 3-21 : Support du comparateur

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.

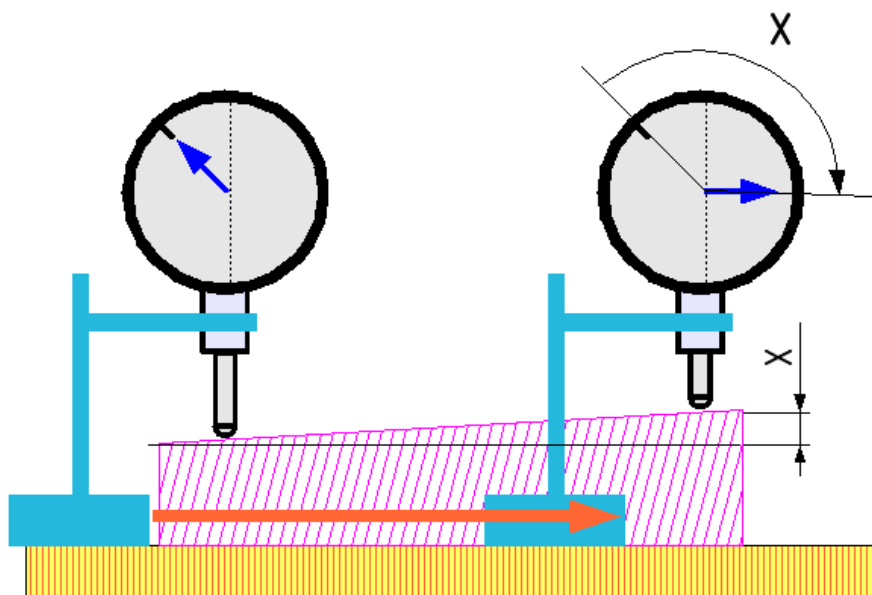


Figure 3-22 : Principe de mesure d'un écart de rectitude avec un comparateur

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" ».

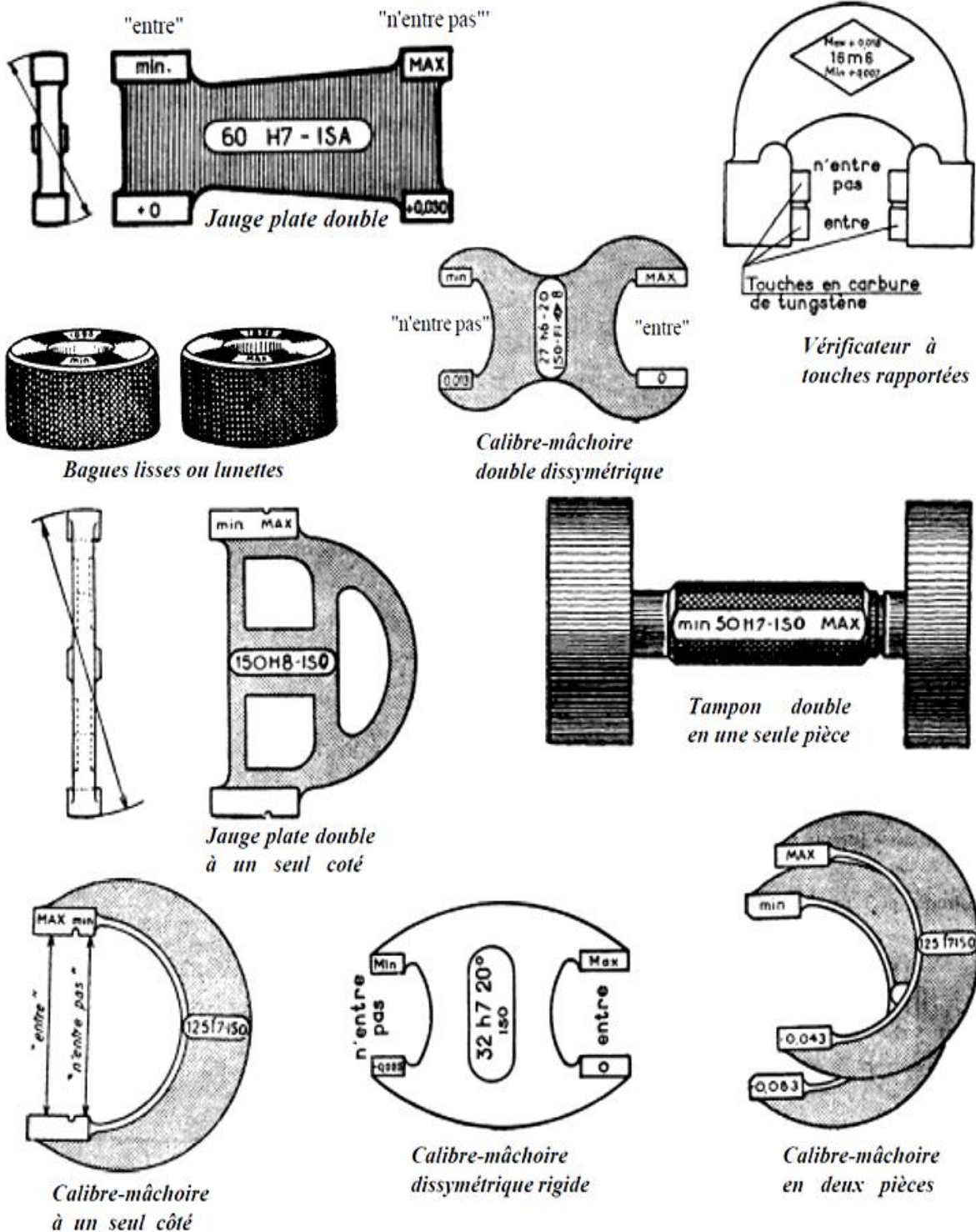




Figure 3-23 : Vérificateurs à tolérances

3.3.3. Mesure et contrôle des états de surface

Profilomètres

Les Profilomètres à contact (palpeurs à pointe) sont basés sur le contact physique entre une pointe en diamant et la surface à mesurer. La pointe du palpeur (généralement une pointe diamant fine pour reconnaître les écarts de forme fins) est montée sur un système sans friction. Lorsque le palpeur est guidé sur la surface par le dispositif d'avance, la forme des irrégularités de la surface est reconnue "fidèlement" par la pointe du palpeur. 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 variations verticales de position de la pointe sont transformées en signaux électriques par le convertisseur électromécanique intégré (amplification, filtrage), et ces signaux sont transmis au système de mesure et d'analyse (calculateur). 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.

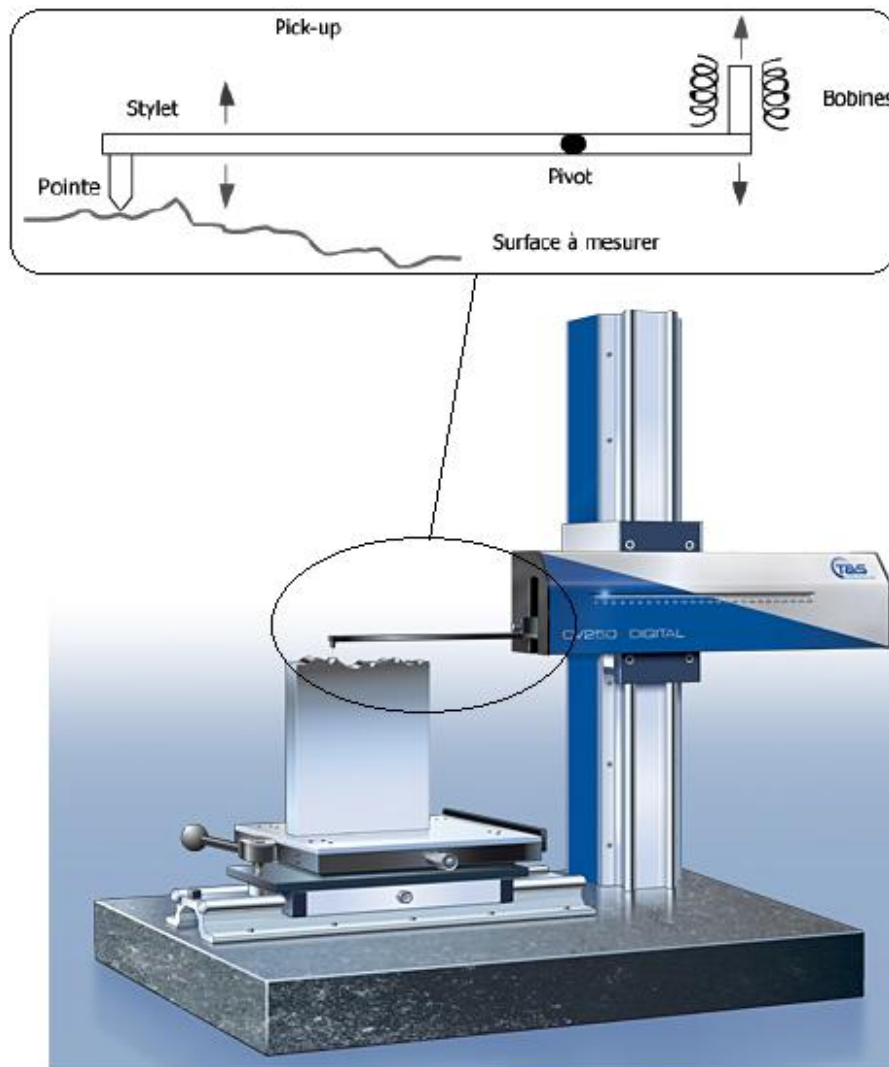


Figure 3-24 : Profilomètre

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.

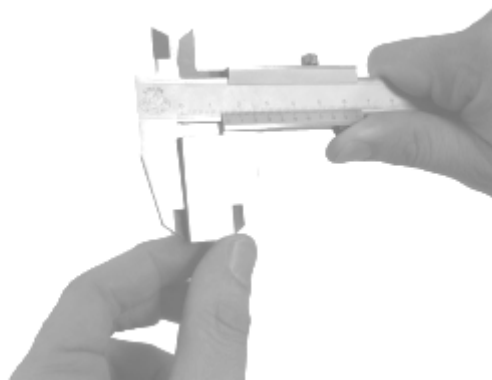


Figure 3-25 : Réglage d'un pied à coulisse

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 ».

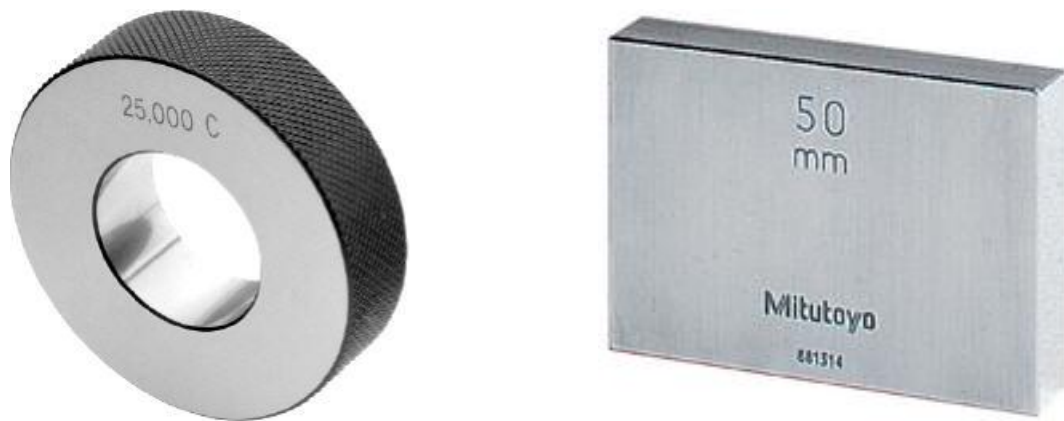


Figure 3-26 : Etalons

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.

L'opérateur chargé d'effectuer une mesure dimensionnelle dans un atelier de production ou dans un laboratoire de métrologie va utiliser pour réaliser cette mesure des étalons de longueurs différentes. Ces étalons lors de leur acquisition doivent être accompagnés d'un certificat délivré par un organisme de normalisation en métrologie (paragraphe 1.3), qui définit leurs caractéristiques exactes. La normalisation actuellement en vigueur range les cales étalons dans quatre classes d'étalonnage suivant les défauts mesurés sur celles-ci (Tableau 3-5).

Dimension nominale		Classe 00 μm	Classe 0 μm	Classe 1 μm	Classe 2 μm	Classe 3 μm
de	jusqu'à	±0.06	±0.12	±0.20	±0.45	±0.80
	10	±0.07	±0.14	±0.30	±0.60	±1.20
10	25	±0.10	±0.20	±0.40	±0.80	±1.60
25	50	±0.12	±0.25	±0.50	±1.00	±2.00
50	75	±0.14	±0.30	±0.60	±1.20	±2.50
75	100	±0.20	±0.40	±0.80	±1.60	±3.00
100	150	±0.25	±0.50	±1.00	±2.00	±4.00

Tableau 3-5 : Classement des cales-étalons

Chapitre 4. Caractéristiques métrologiques des appareils de mesures

4.1. Introduction

La question que tout le monde se pose face à un résultat de mesure ou d'essai est la suivante : quelle confiance puis-je avoir dans ce résultat ?

L'incertitude a donc pour but de « chiffrer cette confiance » ; elle traduit la dispersion des valeurs associées au mesurande. Elle doit être établie de manière raisonnable et s'exprime sous forme d'un écart-type. Le but ultime de cette incertitude est de fixer un intervalle que l'on aimerait le plus étroit possible et dont on espère que la valeur vraie du mesurande y soit incluse. D'une façon générale la métrologie a pour but de définir la valeur de grandeurs physiques avec un degré d'incertitude aussi faible que nécessaire.

Exemple :

Mesure d'une pièce cotée $100 \pm 0,1$ avec un pied à coulisse.

Un calcul d'incertitude a donné $\pm 0,04$ à 95% \rightarrow Si la mesure est 100,08, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 100,04 et 100,12. En fonction du risque choisi, la pièce sera déclarée **conforme** avec **risque** ou sera **rejetée**.

Si l'on considère la mesure d'une grandeur réelle X , le résultat brut de cette mesure X_i , la valeur fournie par l'appareillage utilisé, sera toujours entachée d'une erreur e . Pour se convaincre de la validité de cette affirmation, il suffirait de demander à n personnes de mesurer de façon totalement indépendante une grandeur réelle X donnée, on constaterait alors que l'on obtiendrait n résultats X_i différents (Figure 4-1), ce qui signifie qu'aux moins $n - 1$ personnes ont commis une erreur en effectuant leur mesure. Les raisons de ces erreurs proviennent essentiellement de l'imperfection des processus mis en œuvre pour réaliser les mesures.

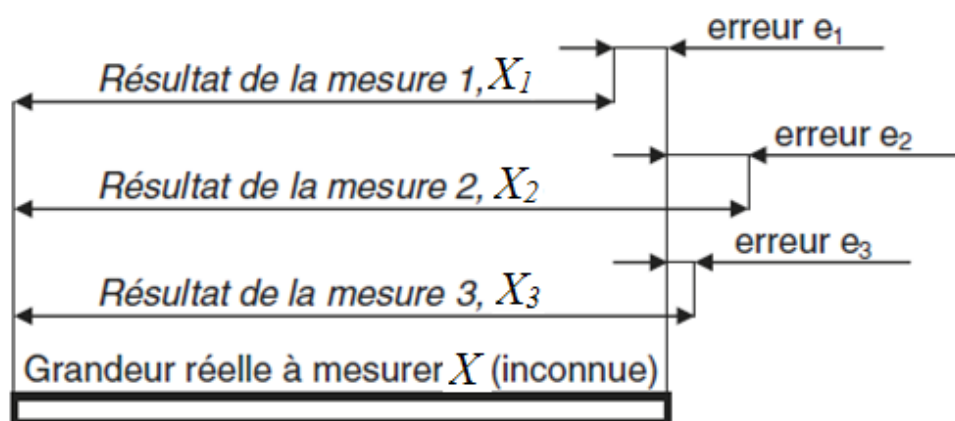


Figure 4-1 : Représentation des erreurs de mesure

Nous aurons donc pour chaque mesure $X = X_i - e_i$. La valeur de l'erreur étant par définition inconnue, ceci entraîne que la valeur de la grandeur réelle X est rigoureusement inaccessible. Par contre l'analyse des causes de l'erreur de mesure et des résultats des différentes mesures réalisées peuvent nous permettre d'estimer une valeur d'étendue $2U$, l'incertitude de la mesure (on appelle conventionnellement U l'incertitude élargie) telle que nous ayons : $(X_i - U) \leq X \leq (X_i + U)$ (voir Figure 4-2).

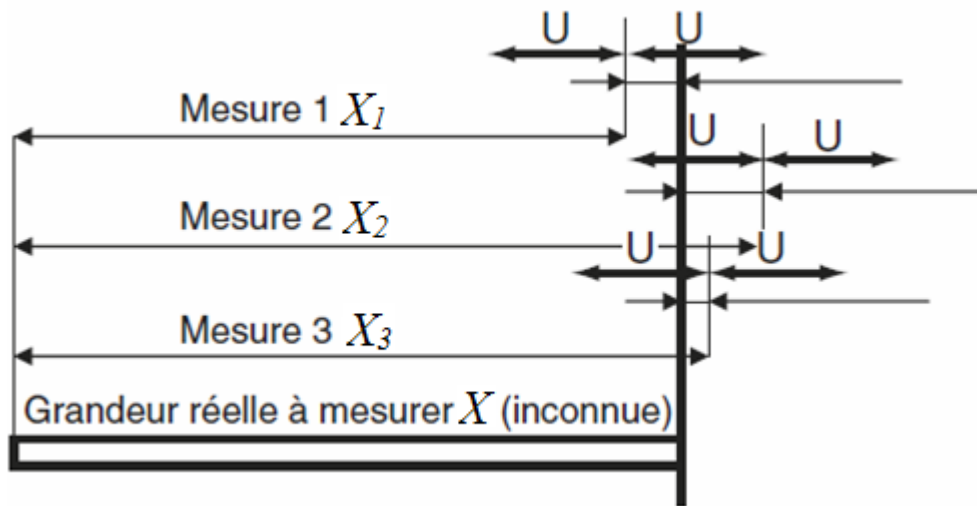


Figure 4-2 : Illustration de la nécessité d'utiliser l'incertitude de mesure

Nous voyons donc que pour être exploitable, le résultat d'une mesure doit impérativement comprendre les trois composantes suivantes :

- Une valeur numérique chiffrant le résultat de la mesure.
- L'indication de l'unité dans laquelle est exprimé ce résultat.
- L'étendue U de l'incertitude élargie sur le résultat exprimé.

Résultat de la mesure = Valeur annoncée \pm incertitude [unités]

Il est donc fondamental de savoir d'où provient l'erreur pour pouvoir évaluer l'incertitude et son étendue.

4.2. Erreurs de mesure et incertitudes

4.2.1. Erreurs dues à l'appareillage utilisé

Un instrument de mesure permet d'établir une relation entre la valeur X du mesurande (grandeur faisant l'objet de la mesure) et la valeur lue X_i du résultat de la mesure.

La qualité des appareils de mesure peut être caractérisée par :

- la fidélité
- la justesse

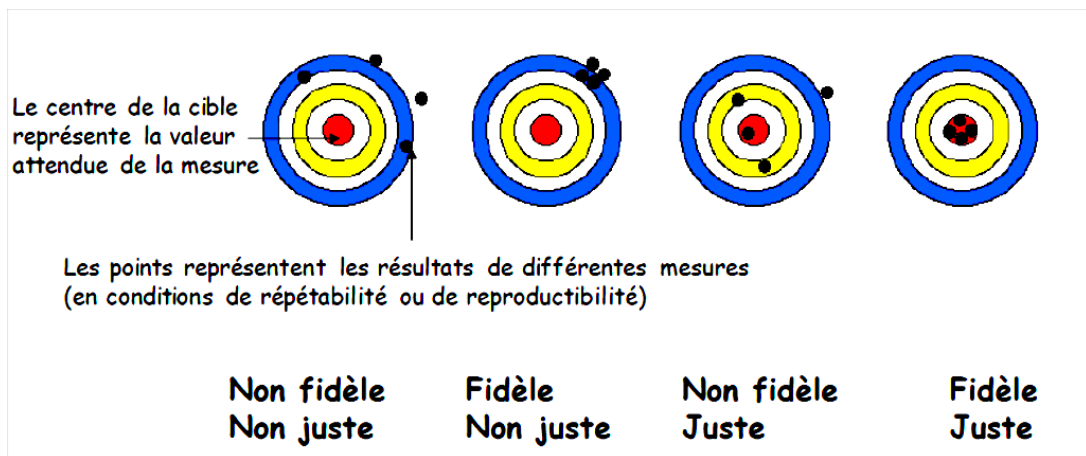


Figure 4-3 : Représentation de la fidélité et de la justesse sous forme de cible

On peut en donner les définitions suivantes :

4.2.1.1. Fidélité

Une méthode est fidèle lorsqu'elle donne toujours le même résultat ou des résultats voisins si on la répète sur le même échantillon ... Elle caractérise la dispersion des mesures X_i d'une même grandeur. On en définit l'écart type σ ou la variance σ^2 :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

avec $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$ (moyenne des X_i)

NB : La définition de σ implique un grand nombre de mesures au cours desquelles il convient de s'assurer que le mesurande n'a pas évolué et que l'ambiance est la même.

- **Répétabilité:** Fidélité sous des conditions de répétabilité (même méthode, même laboratoire, même opérateur, même équipement et pendant un court intervalle de temps)
- **Reproductibilité:** Fidélité sous des conditions de reproductibilité (même méthode dans différents laboratoires, avec différents opérateurs et utilisant des équipements différents).

NB : La fidélité doit être étudiée en utilisant des étalons ou des échantillons authentiques homogènes.

La fidélité peut être considérée à deux niveaux :

- Répétabilité \rightarrow (même série d'analyses)
- Reproductibilité \rightarrow (opérateur et jour et appareillage différents)

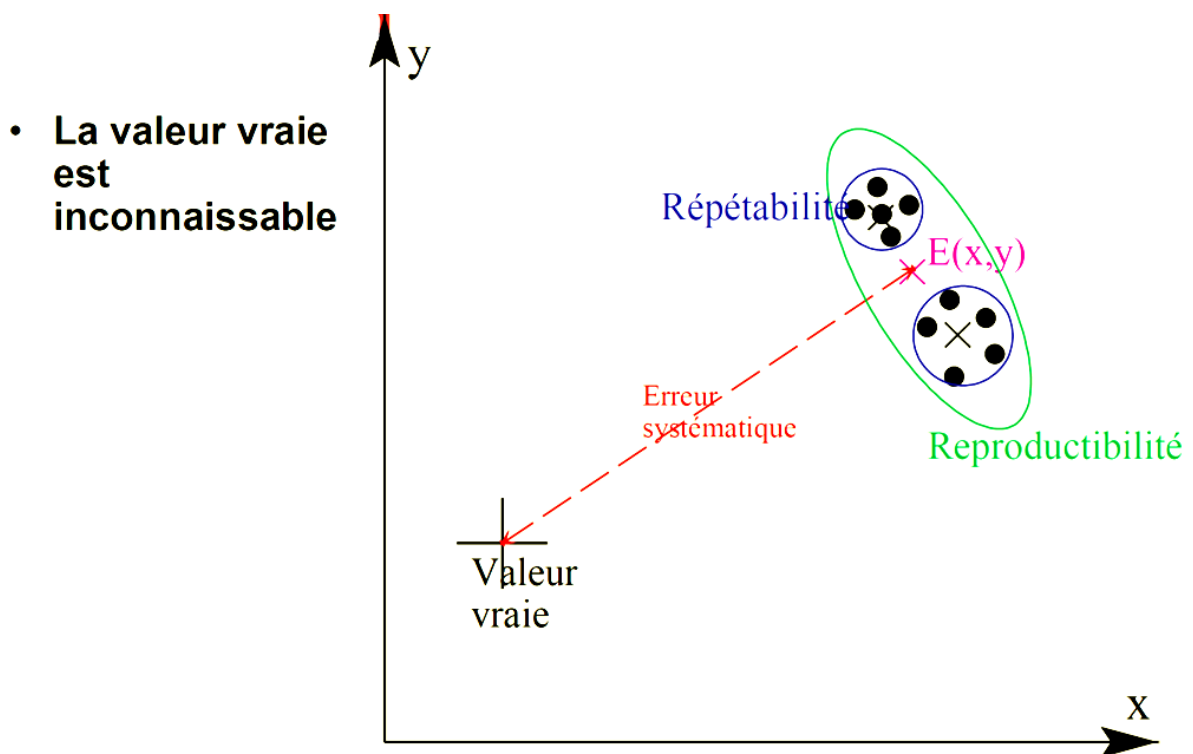


Figure 4-4 : Représentation de la répétabilité et la reproductibilité

4.2.1.2. Justesse (exactitude)

Étroitesse d'accord entre le résultat d'une mesure et la valeur attendue (CIBLE ou valeur réputée vraie). Une méthode est réputée juste quand la moyenne \bar{X} d'un grand nombre de mesures X_i est confondue avec la valeur X du mesurande, quelle que soit la dispersion. L'erreur de justesse J est définie par :

$$J = \bar{X} - X$$

4.2.2. Erreur due à l'évolution de la température

Ce type d'erreur est fréquent et il faut y penser constamment. On retiendra la relation qui lie la variation dimensionnelle à l'élévation de la température.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

Longueur initiale à température $t_0 = L_0$

Longueur à la température $t_1 = L_1$

Coefficient de dilatation linéaire du matériau = α en mm/mm.°C

Un solide de 1 mm de long s'allonge de α mm lors d'une élévation de température de 1°C

4.2.3. Composantes de l'erreur de mesure

Il est important de connaître la structure des erreurs de mesure si l'on veut déterminer la valeur de l'incertitude. Quelle que soit la grandeur d'une erreur de mesure et le nombre des paramètres qui en seront à l'origine, celle-ci comprendra toujours deux parties distinctes, voir Figure 4-5.

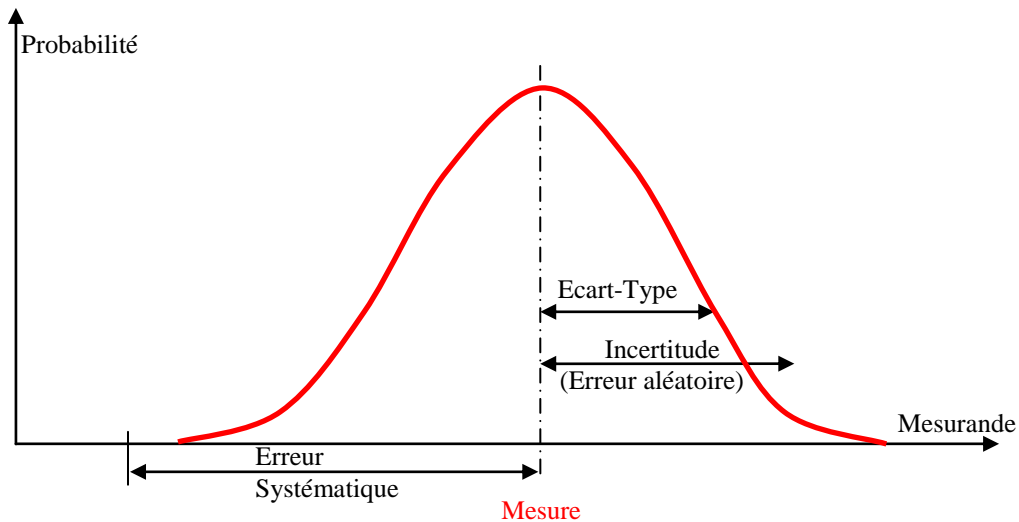


Figure 4-5 : Composantes d'une erreur de mesure

4.2.3.1. Partie systématique

Cette forme d'erreur se répétera toujours de la même façon et dans le même sens. Elle peut être constante, quand elle est due par exemple au défaut de dimension d'un étalon, ou évolutive, si elle provient par exemple de la dilatation thermique de la pièce mesurée. Elle peut être minimisée lorsque l'on connaît avec précision ses origines en réalisant les corrections appropriées sur les résultats de la mesure.

4.2.3.2. Partie aléatoire

Cette forme d'erreur se reproduira d'une façon et dans un sens totalement imprévisibles, elle provient de la multiplicité des paramètres indépendants qui interviennent lors de la réalisation de la mesure. De par sa nature aléatoire, elle est souvent régie par des lois de probabilité (paragraphe 4.3), dont on peut estimer les paramètres en utilisant des méthodes statistiques afin de déterminer approximativement son étendue.

4.3. Quelques lois de probabilité

4.3.1. Loi de distribution rectangulaire

L'emploi de cette loi suppose que la variable x ait la même probabilité de prendre

n'importe quelle valeur dans l'intervalle $]-U, +U[$.

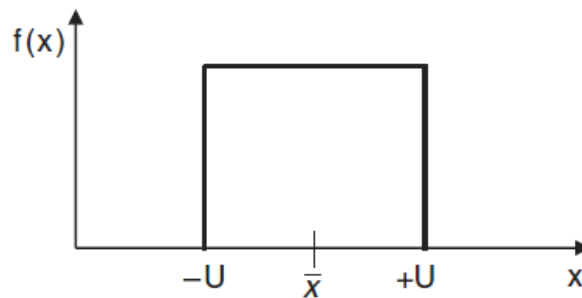


Figure 4-6 : Courbe de distribution d'une loi rectangulaire

Les calculs donnent comme valeur de l'écart type d'une distribution rectangulaire équiprobable dans un intervalle de largeur I ; $\sigma = \frac{I}{2\sqrt{3}}$ ce qui appliqué à notre problème d'incertitude donnerait : $u = \frac{2U}{2\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}}$ et donc $U \approx 1,73u$.

Dans notre cas l'interprétation que l'on peut faire de ce qui précède est la suivante : dans un intervalle $]\bar{X} - u, \bar{X} + u[$ c'est-à-dire pour $k = 1$, il y aurait une probabilité $p = 0,577$ de trouver le résultat de la mesure X_i , dans un intervalle $]\bar{X} - 2u, \bar{X} + 2u[$ c'est-à-dire pour $k = 2$ cette probabilité serait bien entendu de 1.

4.3.2. Loi de distribution triangulaire

Les calculs donnent comme valeur de l'écart type d'une distribution triangulaire symétrique dans un intervalle de largeur I ; $\sigma = \frac{I}{2\sqrt{6}}$; ce qui, appliqué à notre problème d'incertitude donnerait : $u = \frac{2U}{2\sqrt{6}} = \frac{U}{\sqrt{6}}$ et donc $U \approx 2,45u$.

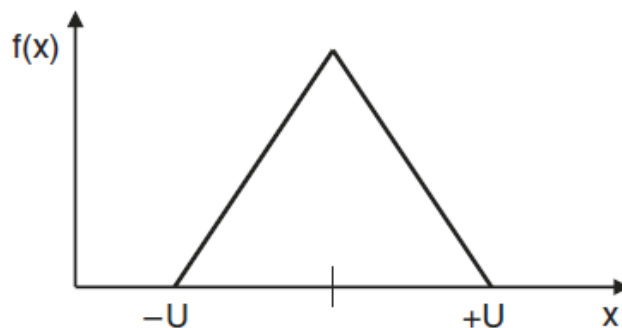


Figure 4-7 : Courbe de distribution d'une loi triangulaire

L'interprétation que l'on peut faire de ce qui précède est la suivante : dans un intervalle $]\bar{X} - u, \bar{X} + u[$ c'est-à-dire pour $k = 1$, il y aurait une probabilité $p = 0,65$ de trouver le résultat de la mesure X_i ; et dans un intervalle $]\bar{X} - 2u, \bar{X} + 2u[$ c'est-à-dire pour $k = 2$ cette

probabilité serait de 0,965 ; naturellement dans un intervalle $[\bar{X} - 3u, \bar{X} + 3u]$ c'est-à-dire pour $k = 3$ la probabilité serait de 1.

4.3.3. Loi de distribution normale

Les calculs donnent comme valeur de l'écart type d'une distribution normale dans un intervalle de largeur I ; $\sigma = \frac{I}{3}$; ce qui, appliqué à notre problème d'incertitude donnerait : $u = \frac{2U}{6} = \frac{U}{3}$ et donc $U = 3u$.

On peut obtenir le tracé de la probabilité P (ou f sur la figures de distribution) en utilisant la relation suivante :

$$p(x) = f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}$$

x est comprise dans un intervalle $[X_{min} ; X_{max}]$. Cet intervalle est défini à partir des mesures obtenues.

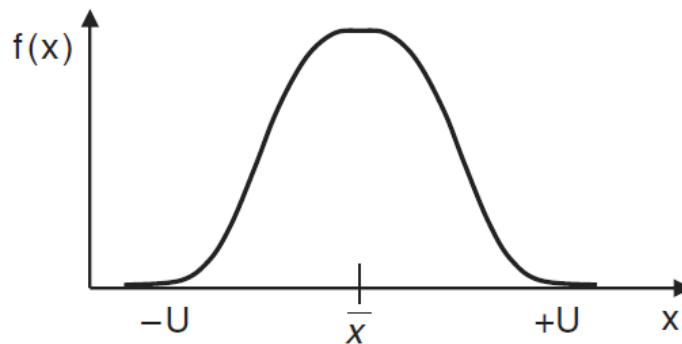


Figure 4-8 : Courbe de distribution d'une loi normale

L'interprétation que l'on peut faire de ce qui précède est la suivante : dans un intervalle $[\bar{X} - u, \bar{X} + u]$ c'est-à-dire pour $k = 1$, il y aurait une probabilité $p = 0,683$ de trouver le résultat de la mesure X_i ; et dans un intervalle $[\bar{X} - 2u, \bar{X} + 2u]$ c'est-à-dire pour $k = 2$ cette probabilité serait de 0,954 ; naturellement dans un intervalle $[\bar{X} - 3u, \bar{X} + 3u]$ c'est-à-dire pour $k = 3$ la probabilité serait de 0,9973 c'est-à-dire pratiquement 1.

4.4. Evaluation d'une incertitude simple

L'incertitude étant le moyen de prendre en compte les erreurs inévitables que l'on commet lors de la mesure, erreurs que l'on ne connaît pas (en effet si l'on connaissait ces erreurs il suffirait alors d'effectuer les corrections nécessaires pour obtenir la valeur vraie). En aucun cas on ne pourra calculer une valeur exacte de l'étendue de l'incertitude. On ne pourra qu'estimer une valeur plus ou moins proche de la réalité.

L'estimation de l'incertitude sera calculée à partir d'outils statistiques, c'est-à-dire en considérant les résultats de plusieurs mesures X_i (échantillon) en faisant des hypothèses sur les lois de distribution de ces mesures, et en réalisant les calculs correspondants. En général, les résultats issus de cette méthode seront exprimés par une moyenne (\bar{X}) et un écart type σ (X_i). Naturellement, dans les calculs d'incertitudes par « **une méthode de type A** » on admettra que $u(X_i)$ est égale à $\sigma(X_i)$. L'incertitude globale sur toutes les mesures effectuées avec un appareil de mesure sera une fonction de ces incertitudes partielles :

$$U_{\text{globale}} = f(U_{\text{environnement}}, U_{\text{opérateur}}, U_{\text{résolution}}, U_{\text{justesse}}, U_{\text{fidélité}}, \dots)$$

4.4.1. Application

Voici un exemple de la détermination de l'incertitude sur des mesures de longueur effectuées avec un pied à coulisse (Tableau 4-1). Ces mesures ont été réalisées par les étudiants d'une façon totalement indépendante sur une pièce en (Coefficient de dilatation micron/°C/m), dont la température de la pièce à mesurer fut $20^{\circ} \pm 10^{\circ}$. Afin de tenir compte de la justesse du pied à coulisse, supposons 10 mesures, d'une cale étalon de à% (Tableau 4-2), prise avec le même pied à coulisse.

Tableau 4-1 : Résultats des mesures de la pièce (.....)

Tableau 4-2 : Résultats des mesures d'un étalon

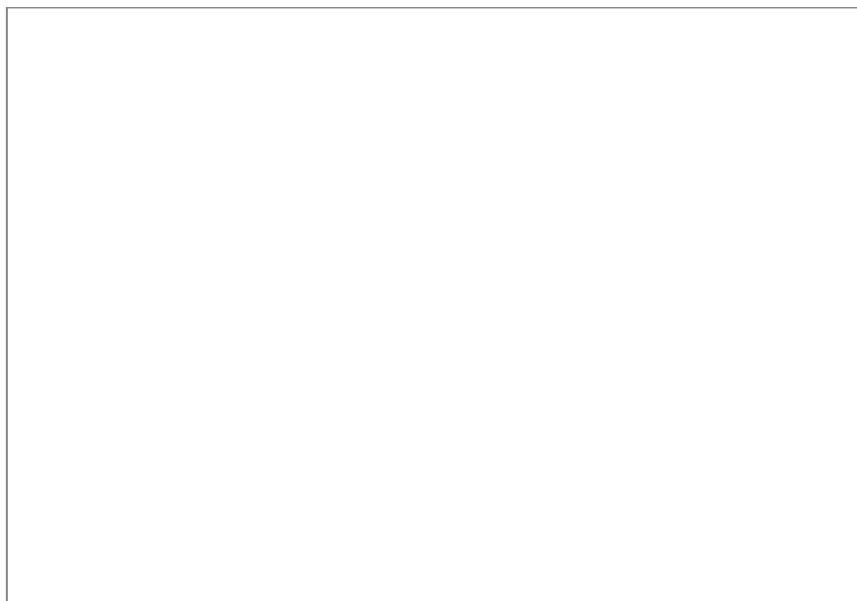


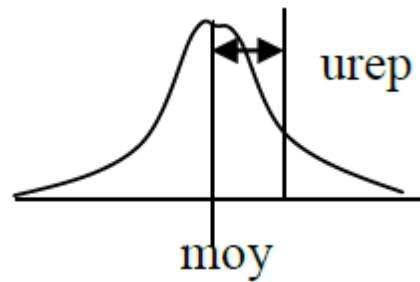
Figure 4-9 : Tracé de la courbe de distribution d'une loi normale à partir des mesures sur la pièce

1. Fidélité (Répétabilité)

La répétabilité est un essai rapide qui permet de se faire une idée de la fidélité de l'appareil

Répétabilité = $\pm 2u_{rep}$ avec $u_{rep} = \sigma$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} = u_{rep} =$$



2. Justesse

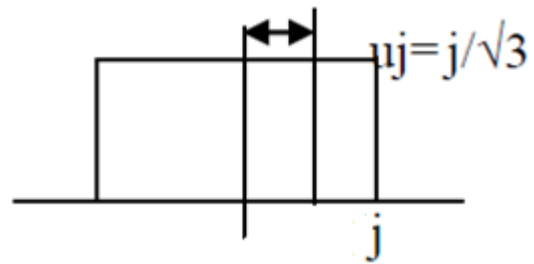
L'erreur de justesse = moyenne des mesures de l'étalon - valeur étalon

$$J = \bar{X}_{etalon} - X_{etalon} =$$

J n'est pas un écart type.

En utilisant la loi de distribution rectangulaire, on a :

$$u_j = \frac{2J}{2\sqrt{3}} =$$



3. Incertitude étalon :

L'étalon utilisé est de à une probabilité de%, donc $u_{et} = \dots\dots\dots$

$$u_{et} = \dots\dots\dots$$

4. Variation de T° de la pièce

Une température de $20^\circ \pm 10^\circ\text{C}$ implique une dilatation ΔL :

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot \bar{X}$$

$$\Delta L = \dots\dots\dots mm$$

$$u_{T^\circ} = \frac{2\Delta L}{2\sqrt{3}} = \dots\dots\dots$$

Nous nous limiterons à ces paramètres principaux, on pourrait en ajouter d'autres comme la Résolution de l'appareil ... etc.

Incertitude globale est la composition des écarts types (somme quadratique) :

$$u_{Globale} = \sqrt{(u_{rep})^2 + (u_j)^2 + (u_{et})^2 + (u_{T^\circ})^2}$$

$$u_{Globale} \approx \dots \dots \dots$$

Incertitude de mesure élargie :
(facteur d'élargissement $k=2$)

4.4.2. Ecriture de l'incertitude de mesure

$\bar{X} = \dots \dots \dots mm$	Mesure
$\pm \dots \dots \dots mm$	Incertitude de la mesure
$\dots \dots \dots \%$	niveau de confiance

La mesure est:

4.5. Conformité des mesures

Après avoir vu les matériels de mesure (Chapitre 4) et le calcul d'une incertitude simple (paragraphe 4.4), se pose la question de la conformité de la cote mesurée. Toute mesure est associée à une incertitude. Lorsque la mesure est au centre de l'intervalle de tolérance et que l'incertitude est faible, on ne se pose pas de questions.

Par contre, si la mesure est à la limite de l'intervalle de tolérance, on peut se demander s'il n'y a pas un risque d'accepter une pièce non-conforme.

Il y a deux manières de résoudre ce problème :

4.5.1. Ancienne méthode

Si l'incertitude de mesure est faible ($\leq 1/4 IT$), on accepte toutes les pièces dont la mesure est contenue dans l'intervalle de tolérance. On prend un risque représenté sur le schéma de la Figure 4-10.

4.5.2. Nouvelle méthode

On doit jeter les pièces à risque. On jette donc plus de pièces mais il n'y a pas de risque d'envoyer un mauvais produit au client.

Cette méthode est avantageuse si on a une bonne maîtrise de la métrologie. Tout investissement en métrologie (matériel, formation etc.) sera valorisé car on éliminera moins de pièces.

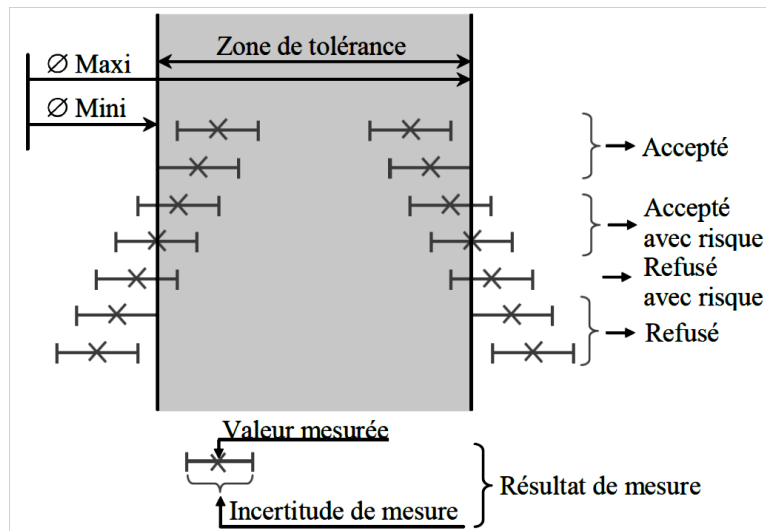


Figure 4-10 : Conformité d'une mesure

4.5.3. Exemples

Si on mesure une pièce, cotée 100 ± 1 dans un dessin de définition, avec un pied à coulisse. Un calcul d'incertitude a donné $\pm 0,25$ à 95%

1^{er} cas : Si la mesure est 100,08, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 99,83 et 100,33

→ La pièce sera déclarée **conforme** sans **risque (acceptée)**

2^{ème} cas : Si la mesure est 100,92, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 100,67 et 101,17

→ La pièce sera déclarée **conforme** avec **risque (acceptée avec risque)** selon l'ancienne méthode ou **non-conforme (refusée)** selon la nouvelle méthode

3^{ème} cas : Si la mesure est 101,02, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 100,77 et 101,27

→ La pièce sera déclarée **non-conforme** avec **risque (refusée avec risque)** selon l'ancienne méthode ou **non-conforme** selon la nouvelle méthode

4^{ème} cas : Si la mesure est 101,3, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 101,05 et 101,55

La pièce sera déclarée **non-conforme** selon l'ancienne et la nouvelle méthode

Références bibliographiques

1. M. PRIEL. « Vocabulaire de la métrologie ». Techniques de l'ingénieur, R115, 2010.
2. M. Dursapt. « Aide-mémoire Métrologie dimensionnelle ». Edition Dunod, Paris, France, 2009.
3. F. Taillade. « Notions de métrologie ». cel-00564306, version 1, 2011.
4. « Le Système International d'Unités ». Bureau International des Poids et Mesures – Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre, 8^{ème} Edition 2006.
5. A. Chevalier. « Guide du dessinateur industriel ». édition Hachette, 2004.
6. S. Bensaada et D. Feliachi. « Le dessin technique, deuxième partie : Le dessin industriel ». Edition O.P.U, 1994.
7. http://cyril.domptail.perso.sfr.fr/autres/1_resume_de_metrologie_dimensionnelle.pdf
8. <http://marc.terrier76.perso.sfr.fr/images/micrometre.pdf>
9. <http://jm.karrer.free.fr/documents/MMT1.pdf>
10. <http://fr.scribd.com/doc/3605338/metrologie-de-base>
11. <http://www.fsr.um5a.ac.ma/cours/chimie/bchitou/Cours%20metrologie%20et%20assurance%20qualit%E9%20Licence%20Professionnelle-%20BCHITOU.pdf>
12. <http://slideplayer.fr/slide/1582828/>

Autres références bibliographique :

1. Manuel de technologie mécanique, Guillaume SABATIER, et al Ed. Dunod.
2. Memotech : productique matériaux et usinage BARLIER C. Ed. Casteilla
3. Sciences industrielles MILLET N. ed. Casteilla
4. Memotech : Technologies industrielles BAUR D. et al , Ed. Casteilla
5. Métrologie dimensionnelle CHEVALIER A. Ed. Delagrave
6. Perçage, fraisage JOLYS R et LABELL R. Ed. Delagrave
7. Guide des fabrications mécaniques PADELLA P. Ed. Dunod
8. Technologie : première partie, Bensaada S et FELIACHI d. Ed. OPU Alger
9. تكنولوجيا عمليات التصنيع خريز ز و فواز د، ديوان المطبوعات الجامعية الجزائرية