

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbas
Faculté de Technologie
Département d'EBST



جامعة جيلالي ليابس سيدي بلعباس
كلية التكنولوجيا
قسم التعليم الأساسي للعلوم و التكنولوجيا

Polycopié de cours : METROLOGIE



Spécialité 2^{ème} Année Licence Sciences et Technologies

Réalisé par : Dr. KHALFI Yassine

Année Universitaire 2022/2023

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS

INTRODUCTION

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LA METROLOGIE6

1.1 Définitions6

1.2 Vocabulaires métrologiques.....6

1.2.1 Grandeur6

1.2.2 Valeur d'une grandeur7

1.2.3 Valeur vraie.....7

1.2.4 Valeur conventionnellement vraie.....7

1.2.5 Mesurande.....7

1.2.6 Mesurage.....7

1.2.7 Grandeurs d'influence7

1.3 Instituts de métrologie et de normalisation8

1.3.1 Instituts nationaux de métrologie8

1.3.2 Organismes internationaux de métrologie8

1.3.3 Instituts de normalisation.....8

1.3.4 Organismes d'accréditation8

1.3.5 Autres instituts et organismes de métrologie8

CHAPITRE 2. SYSTEME INTERNATIONAL DE MESURE SI9

2.1. Introduction.....9

2.2. Unités de bases du SI.....9

2.2.1. Unité de longueur: le mètre (symbole: m)9

2.2.2. Unité de masse : le kilogramme (symbole : kg).....9

2.2.3. Unité de temps : la seconde (symbole: s)9

2.2.4. Unité de courant électrique: l'ampère (symbole : A)9

2.2.5. Unité de température thermodynamique : le kelvin (K).....10

2.2.6. Unité de quantité de matière : la mole (symbole: mol)10

2.2.7. Unité d'intensité lumineuse : la candela (symbole : cd).....10

2.3. Unités dérivées10

2.4. Unités supplémentaires12

2.5. Multiples et sous-multiples12

CHAPITRE 3. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES APPAREILS DE

MESURES.....	14
3.1. Incertitude de Mesurage	14
3.2. Principaux caractéristiques d'un instrument de mesure	14
3.2.1. Etendue de Mesure (Capacité).....	14
3.2.2. Résolution.....	15
3.2.3. Sensibilité	15
3.2.4. Justesse	15
3.2.5. Fidélité.....	16
3.2.6. Répétabilité.....	18
3.2.7. Reproductibilité.....	18
3.2.8. Exactitude	18
3.2.9. Reproductibilité.....	19
3.3. Classification des instruments de mesure.....	19
3.3.1. Vérificateur à dimensions variables	19
3.3.2. Vérificateur à dimension fixe.....	21
3.4. Machines à mesurer tridimensionnelles	22
3.4.1. Aperçue historique	22
3.4.2. Principe général.....	22
3.4.3. Architecture des Machines à Mesurer Tridimensionnelles	23
3.4.4. Dispositif de palpage	23
3.4.5. Avantages et limitations	24
CHAPITRE 4. MESURES ET CONTROLES	25
4.1. Introduction.....	25
4.2. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue de contrôle	25
4.2.1. Définition.....	25
4.2.2. Spécifications d'un dessin de définition	26
4.2.2.1 Spécifications dimensionnelles et angulaires	26
4.2.2.2 Spécifications géométriques.....	32
4.2.2.3 Spécifications d'état de surface	34
4.3. Méthodes de mesure et de contrôle	35
4.3.1 Contrôle direct des dimensions	35
4.3.1.1 Pied à coulisse (Calibre à coulisse).....	35
4.3.1.2 Micromètre (Palmer).....	38
4.3.2 Contrôle indirect ou par comparaison	41
4.3.2.1 Compérateurs.....	41

4.3.2.2	Vérificateurs à tolérances	44
4.3.3	Mesure et contrôle des états de surface	49
4.3.3.1	Profilomètres	49
4.3.4	Étalonnage	50
4.3.4.1	Étalons.....	50
4.3.4.2	Étalonnage, vérification et ajustage d'un équipement demesure	52

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AVANT PROPOS

La genèse d'une innovation technologique est constituée par l'ensemble des faits scientifiques et techniques qui ont concouru à sa formation. La connaissance approfondie de cette phase préalable, difficile à observer quand elle est en cours, mais pourrait se reconstituer, à posteriori, est essentielle pour tenter de prévoir et de diriger le flux des changements techniques tout le long des différentes étapes des développements scientifiques. Cet ouvrage traite les fondements technologiques de la métrologie, qui est l'ensemble des moyens techniques utilisés pour le contrôle des pièces mécaniques. Dans l'industrie la métrologie s'intéresse au contrôle, à la vérification et au mesurage des pièces mécaniques. Le contrôle s'effectue sur les machines, pièces finies ou en cours de fabrication et sur les organes mécaniques exposés aux usures ou déformations dues au fonctionnement (frottement entre deux pièces). La vérification est le mesurage se font aussi sur les machines outils et organes mécaniques. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques et des opérations nécessaires, ainsi que des notions de base en fabrication technologique, ou sont mis en évidence, les notions fondamentales des tolérances et ajustements ainsi que les états de surfaces, car étant des connaissances de base, impératives pour la fabrication en technologie. Cependant, à travers cet ouvrage, j'ai voulu essayé de porter toute l'attention et le soin voulus, du point de vue pédagogique et didactique, afin de vous exposer, de manière utile, les bases fondamentales de la métrologie.

Cet ouvrage est destiné aux étudiants de deuxième année des classes préparatoires aux grandes écoles et aux étudiants du tronc commun du domaine science et technologie des universités du système LMD, Il est rédigé avec un style très simple, qui permet aux étudiants du premier cycle universitaire une compréhension très rapide. Le contenu de ce polycopié est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre expose une généralité sur la métrologie à savoir une définition et les vocabulaires métrologiques ainsi les différents Instituts de métrologie et de normalisation. Dans ce contexte, le chapitre deux 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, notamment les unités de bases du SI et les unités dérivées. Le chapitre trois concerne les caractéristiques métrologiques des appareils de mesures. Le dernier chapitre sera étalé aux différentes méthodes de mesures et de contrôles.

Tout commentaire, proposition ou critique constructive permettant l'amélioration des textes ainsi élaborés sera recueillie avec grand intérêt.

Dr KHALFI Yassine

INTRODUCTION

OBJET DE LA METROLOGIE

La métrologie est la « science des mesurages et ses applications ; elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application ». Un mesurage est un processus qui permet d'obtenir une ou plusieurs valeurs que l'on peut attribuer à une grandeur ou mesurande. L'incertitude de mesure est la dispersion des valeurs attribuées à une grandeur mesurée ou mesurande.

Utilité de la Métrologie

- Maîtriser les processus de fabrication;
- Vérifier et évaluer la conformité des produits aux spécifications techniques et réglementaires;
- Contrôler la qualité des produits;
- Vérifier l'exactitude des résultats analytiques;
- Assurer la loyauté des échanges commerciaux et la protection des intérêts du consommateur;
- Assurer la protection de la santé et de la sécurité des citoyens;
- Assurer la préservation et la protection de l'environnement;

LES DIVISIONS DE LA METROLOGIE

La métrologie est la science des mesures, elle embrasse tous les aspects aussi bien théoriques que pratiques. Ces mesures sont obtenues avec un niveau d'incertitude bien déterminé et concernent pratiquement tous les domaines de la science et de la technologie. Peut être divisée en trois types :

- Métrologie scientifique ou fondamentale
- Métrologie appliquée ou industrielle
- Métrologie légale

La métrologie scientifique ou fondamentale concerne l'établissement des systèmes de mesure, des systèmes d'unité, le développement de nouvelles méthodes de mesure, la réalisation des étalons de référence, le transfert de la traçabilité de ces étalons de référence aux étalons de travail définis dans un milieu donné.

La métrologie appliquée ou Industrielle concerne l'application de la science des mesures à la fabrication et aux autres processus industriels, le choix des instruments de mesure en adéquation avec leurs applications, l'étalonnage des instruments de mesure, et le contrôle de la qualité des mesures.

La métrologie légale concerne les exigences réglementaires sur les mesures et les appareils de mesure rentrant dans le cadre des transactions commerciales et la protection des consommateurs.

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 enAlgérie)
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 International
ILAC	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).

Tableau 2.1. Unités de base du SI

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 Electrique	I, i	Ampère	A
Température Thermodynamique	T	Kelvin	K
Quantité De Matière	N	Mole	mol
Intensité Lumineuse	I_v	Candela	cd

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).

Tableau 2.2. Exemples d'unités SI dérivées cohérentes exprimées à partir des unités de base

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 A La Puissance Moins Un	m^{-1}
Masse Volumique	P	Kilogramme Par Mètre Cube	$kg m^{-3}$
Masse Surfaccique	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 2.3. Unités SI dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

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	$m^{-1} kg s^{-2}$
Energie, 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 2.4. 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

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 Surfaccique, Éclairement 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)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$

Energie Massique	Joule Par Kilogramme	J/kg	$m^2 s^{-2}$
Conductivité Thermique	Watt Par Mètre Kelvin	W/(m K)	$m kg s^{-3} K^{-1}$
Energie Volumique	Joule Par Mètre Cube	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$
Champ Electrique	Volt Par Mètre	V/m	$m kg s^{-3} A^{-1}$
Energie Molaire	Joule Par Mole	J/mol	$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$
Entropie Molaire, Capacité Thermique Molaire	Joule Par Mole Kelvin	J/(molK)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
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 Energétique	Watt Par Stéradian	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
Luminance Energétique	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	$m^{-3} s^{-1} mol$

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).

Tableau 2.5. Exemples d'unités SI dérivées exprimées en utilisant des unités supplémentaires

Grandeur	Unité SI	
	Nom	Symbole
Vitesse Angulaire	Radian Par Seconde	Rad.S ⁻¹
Accélération Angulaire	Radian Par Seconde Carrée	Rad.S ⁻²
Luminance Energétique	Watt Par Mètre Carre Stéradian	W.M ⁻² .Sr ⁻¹

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.

Tableau 2.6. Préfixes SI

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

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. Caractéristiques Métrologiques des Appareils de Mesures

3.1. Incertitude de Mesurage

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

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

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

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

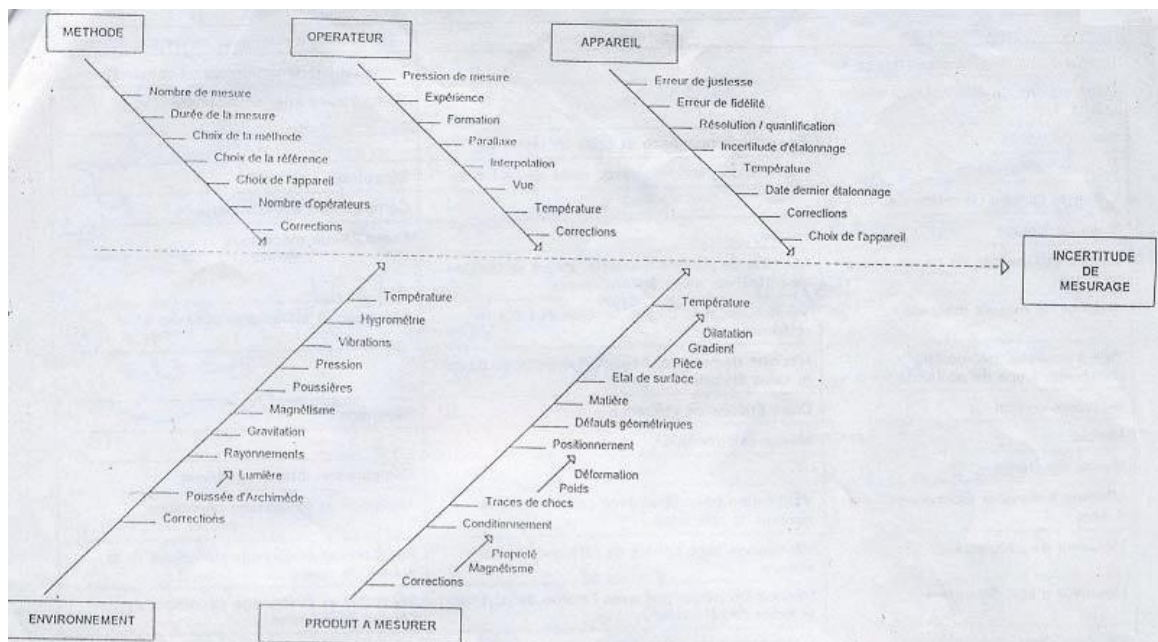
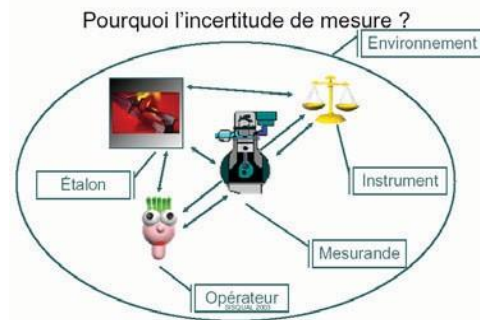


Figure 3.1. Diagramme Causes-Effet d'incertitude de mesurage

3.2. Principaux caractéristiques d'un instrument de mesure

3.2.1. Etendue de Mesure (Capacité) : ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour

lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée maintenue entre des limites spécifiées. Les limites supérieures et inférieures de l'étendue spécifiée sont parfois appelées respectivement «portée maximale» et «portée minimale».

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

Exemples :

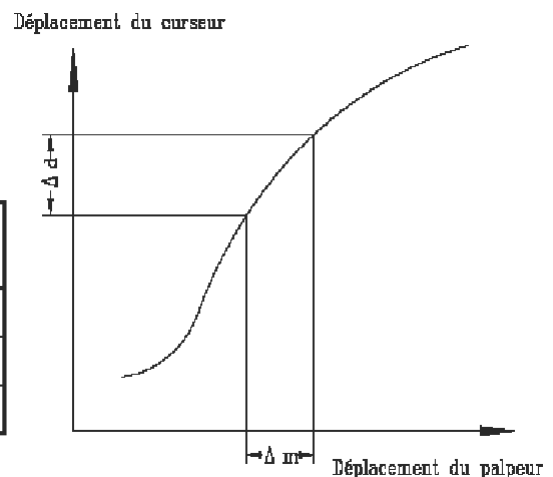
N°	Désignation des instruments de mesurage	Résolution (mm)
1	Réglet	0.5
2	Calibre à coulisse à vernier	0.02
3	Calibre à coulisse digital	0.01

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

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

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

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



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

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

Déplacement du curseur entre deux graduations = 1mm

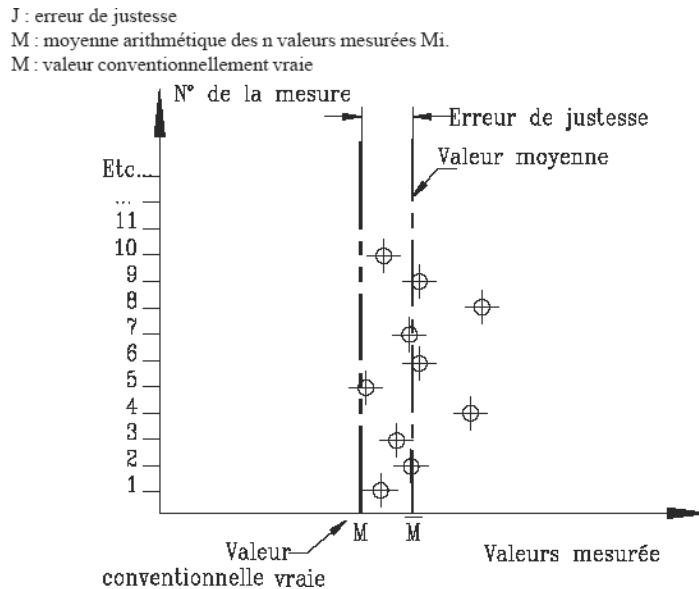
Sensibilité = déplacement du curseur / variation de la grandeur mesurée = 1mm / 0.01mm = 100

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

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

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

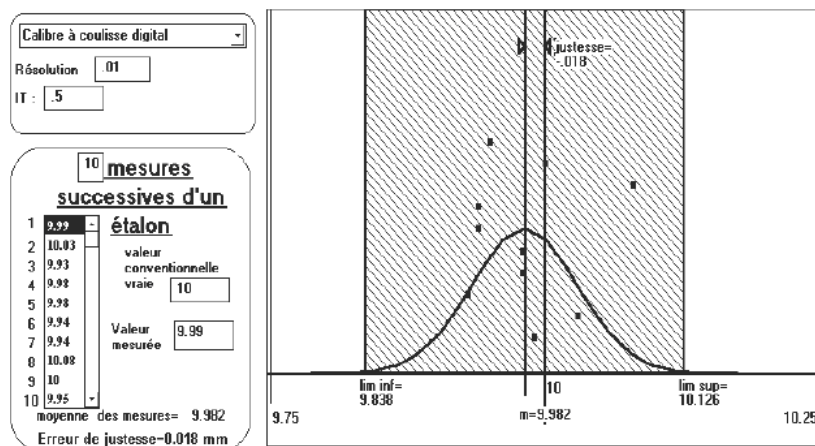
$$J = M - \bar{M} \quad \text{avec} \quad \bar{M} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} M_i$$



Exemples :

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

Application :



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

La valeur moyenne des 10 valeurs mesurées est de 9.982 mm.

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

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

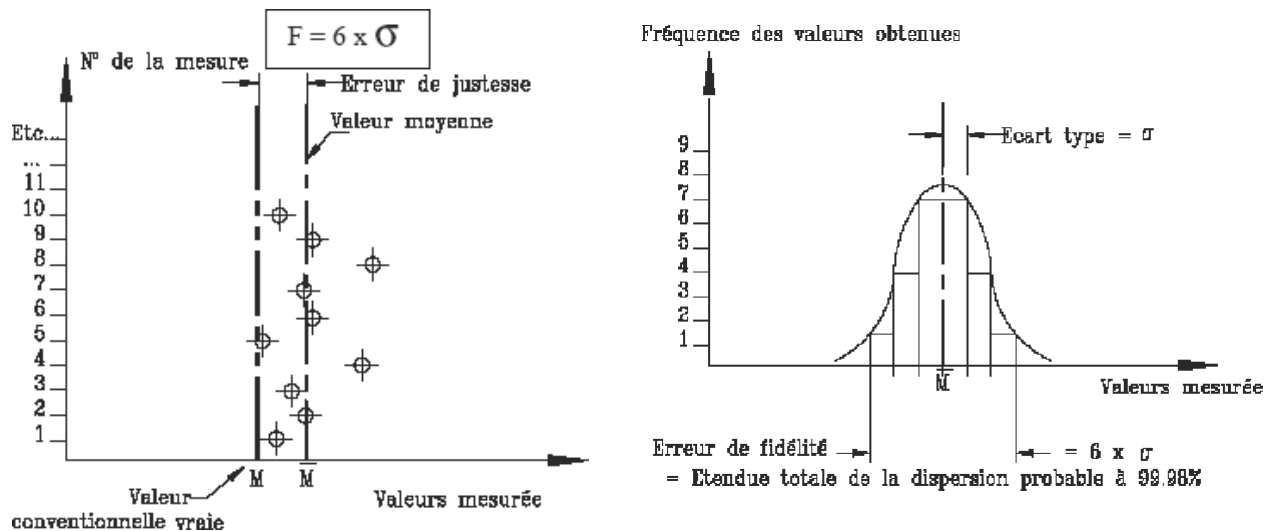
CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES DES APPAREILS DE MESURES

- Réduction en minimum de variation du à l'observateur
- Même observateur
- Même mode opératoire (Même instrument, même condition de mesure)
- Même lieu
- Répétition durant une constante période de temps
- jeux (coulissement, articulations)
- pression de contact plus ou moins grande entraînant des déformations

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

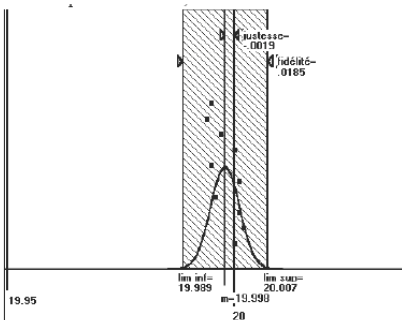
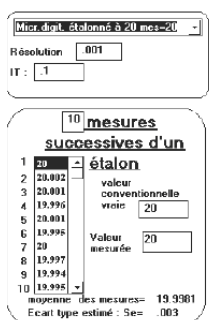
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$$

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

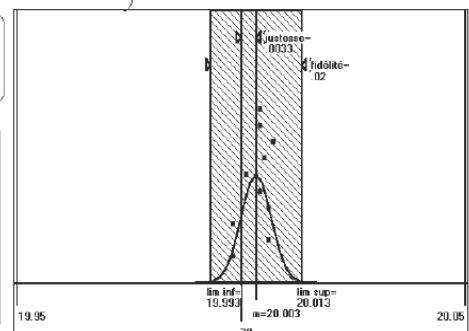
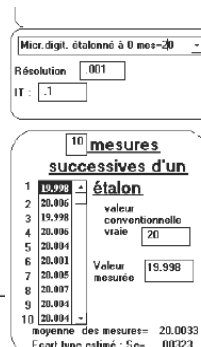


Application :

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



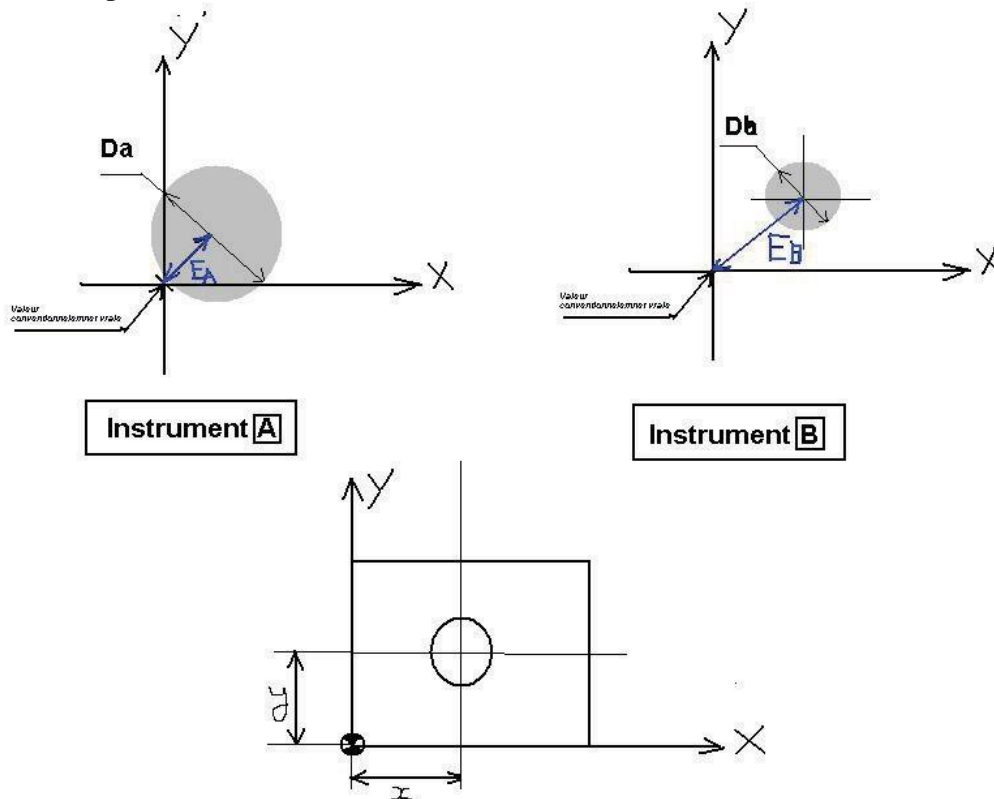
erreur de justesse estimée= -0.0019
 erreur de fidélité estimée= .01853



erreur de justesse estimée= .0033
 erreur de fidélité estimée= .01998

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

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



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

3.2.6. Répétabilité : Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur dans des conditions identiques (même opérateur, même lieu, mesures effectuées successivement dans une courte période de temps, même méthode).

3.2.7. Reproductibilité : Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur en faisant varier les conditions (changement d'opérateur, de lieu, de temps, de méthode).

3.2.8. Exactitude : Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie d'une grandeur mesurée. L'exactitude représente la qualité globale de l'instrument, dans des conditions données. L'erreur d'exactitude comprend l'erreur de justesse et l'erreur de fidélité. L'exactitude correspond à l'incertitude de mesure de l'instrument.

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

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

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

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

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

La classe s'exprime :

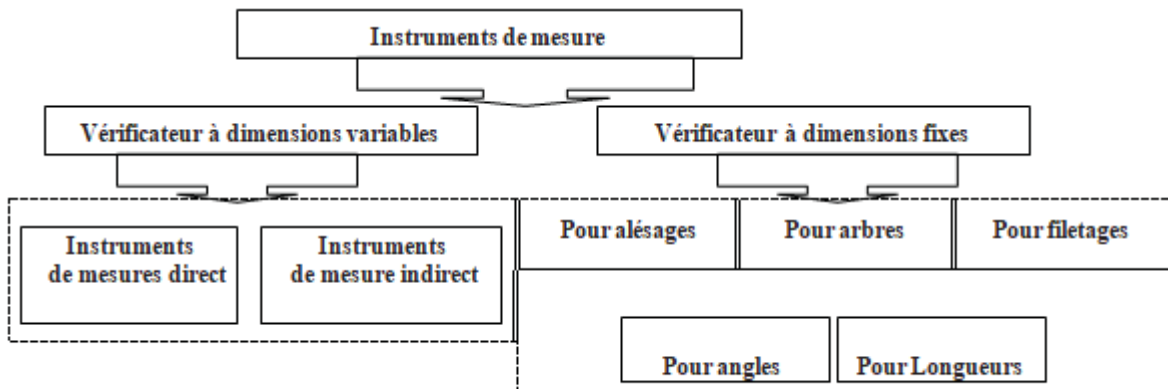
- Soit par le pourcentage de la plus grande indication que peut fournir l'instrument.

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

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

3.3. Classification des instruments de mesure

Les instruments de mesure se divisent en deux grandes classes :



3.3.1. Vérificateur à dimensions variables

a. Instruments de mesure directe



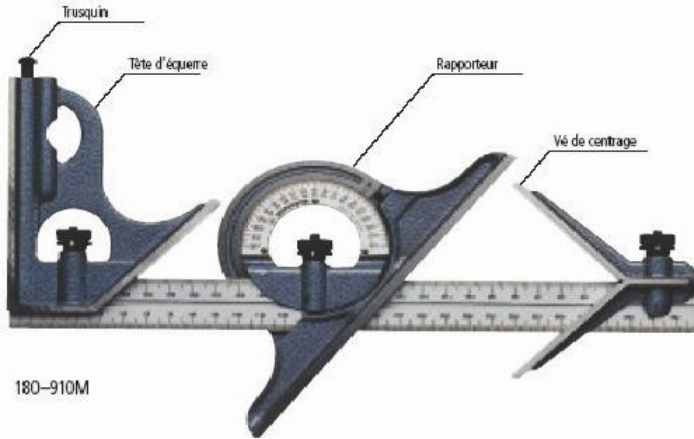
Figure 3.2. Colonne de mesure & Trusquin



Figure 3.3. Pieds à coulisses

CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES DES APPAREILS DE MESURES

Série 180



180-910M

Série 187

Avec sortie de données



Figure 3.4. Rapporteur

Série 527
Sans talon



Figure 3.5. Jauges de profondeur



Série 102

Micromètre d'extérieur avec isolant



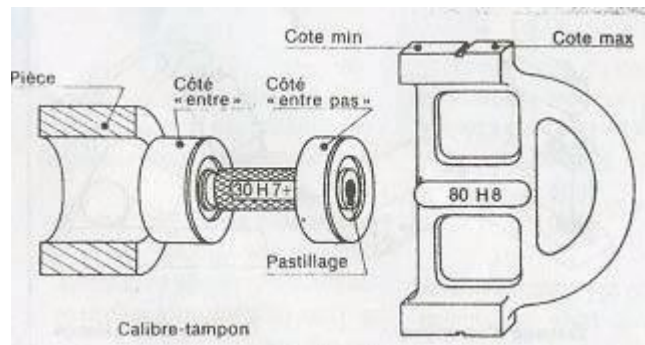
Figure 3.6. Micromètres & jauges micrométriques

b. Instruments de mesure indirect

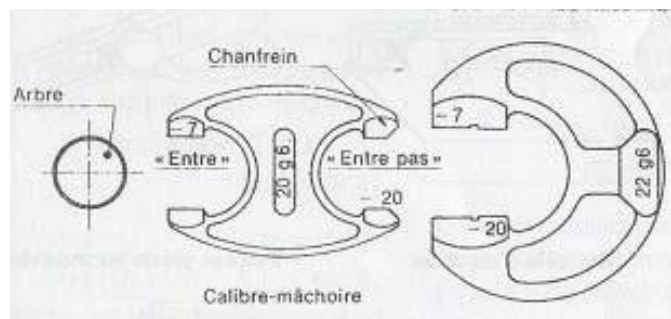


3.3.2. Vérificateur à dimension fixe

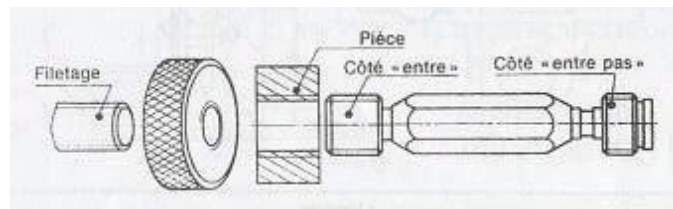
a. Pour Alésages



b. Pour Arbres



c. Pour filetages



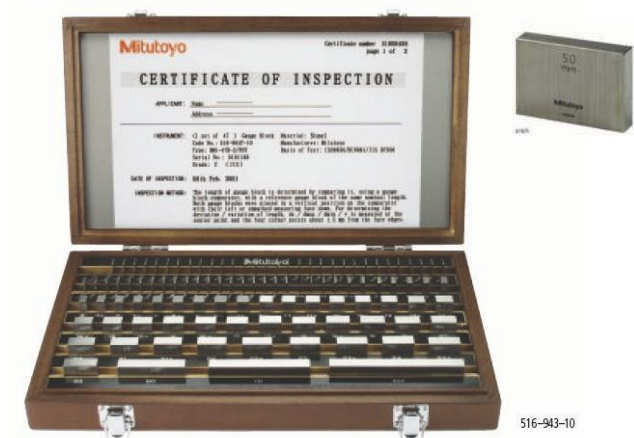
d. Pour Angles

Série 916



e. Pour Longueurs

Série 516



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

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

3.4. Machines à mesurer tridimensionnelles

3.4.1. Aperçue historique

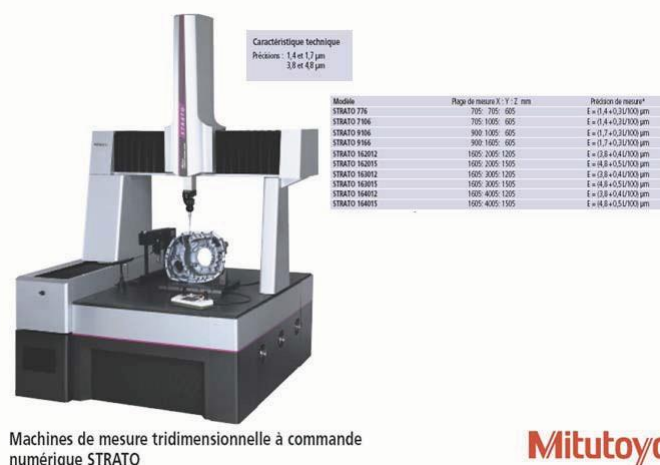
Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) sont nées au début des années soixante et se sont vraiment développées après l'invention du palpeur à déclenchement en 1970. Les principaux concepts qui régissent la mise en œuvre et l'exploitation de ces machines sont en place depuis le début des années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

3.4.2. Principe général

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

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

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

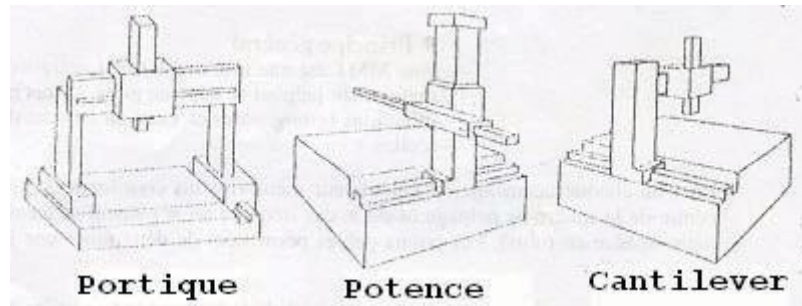


Machines de mesure tridimensionnelle à commande numérique STRATO

3.4.3. Architecture des Machines à Mesurer Tridimensionnelles

Les architectures les plus fréquemment utilisés sont :

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



3.4.4. Dispositif de palpation

Il existe deux types de têtes de palpation :

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

Nécessité d'un contrôle en ligne 

◆ 1^{ère} solution : contrôle par prélèvement sur une MMT



Construction d'un palpeur dynamique

© Dynalog-France 

3.4.5. Avantages et limitations

- Rigueur de mesurage
- Incertitudes de mesurage
- Capacité de mesurage
- Productivité
- Rentabilité

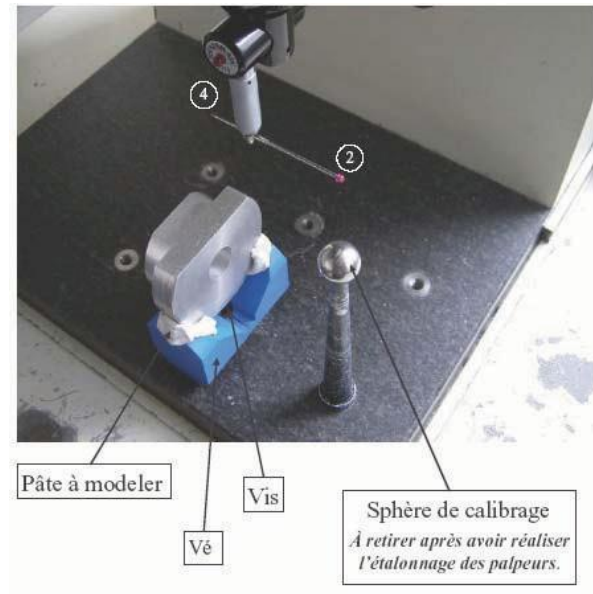
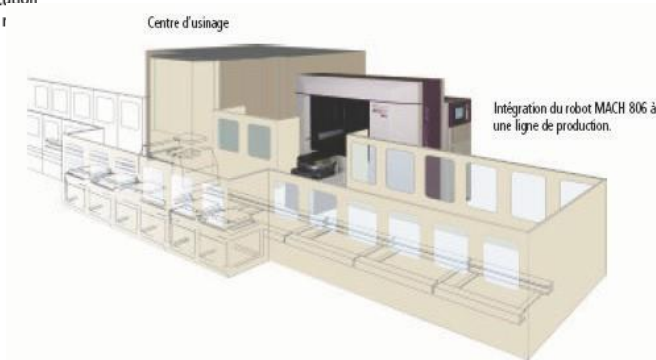


Figure 3.7. Mise en position de la pièce sur la MMT & palpeurs utilisés

Robots de mesure tridimensionnelle à commande numérique MACH

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



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

Mitutoyo

Chapitre 4. Mesures et contrôles

4.1. 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 [6] :

- 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 [6] :

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

Les mesures et/ou les contrôles de pièces mécaniques s'effectuent en respectant les conditions suivantes [6] :

- 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 aux dessins de définition.

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

4.2.1. 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. Ce dessin 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).

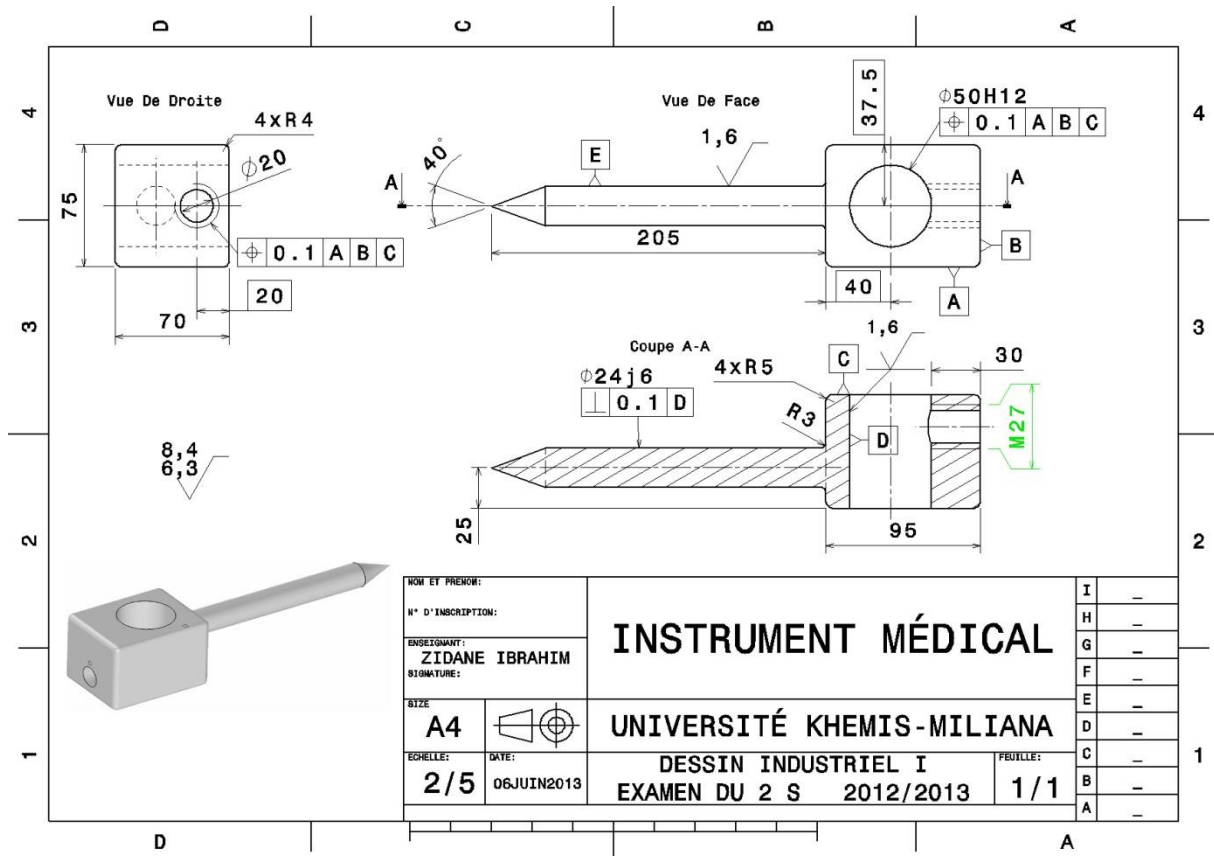


Figure 4.1. Exemple d'un dessin de définition.

4.2.2 Spécifications d'un dessin de définition

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

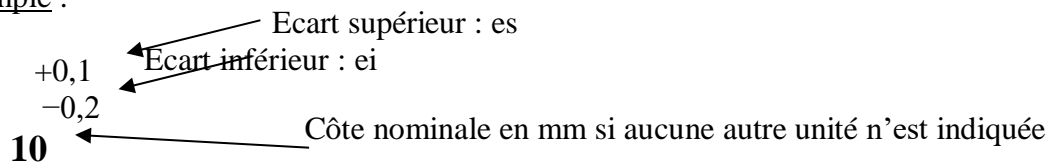
- Spécifications dimensionnelles et angulaires.
- Spécifications géométriques.
- Spécifications d'état de surface.

4.2.2.1 Spécifications dimensionnelles et angulaires

Les spécifications dimensionnelles peuvent se présenter sous plusieurs formes [2-7] :

1. 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

2. Tolérance et Ajustement

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 (arbres et alésages) avec un jeu important, faible ou avec serrage. 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 ce même tableau des ajustements afin 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).

Exemple : $\varnothing 20H7/g6$

Ajustement dit à alésage (H) avec serrage garanti :

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

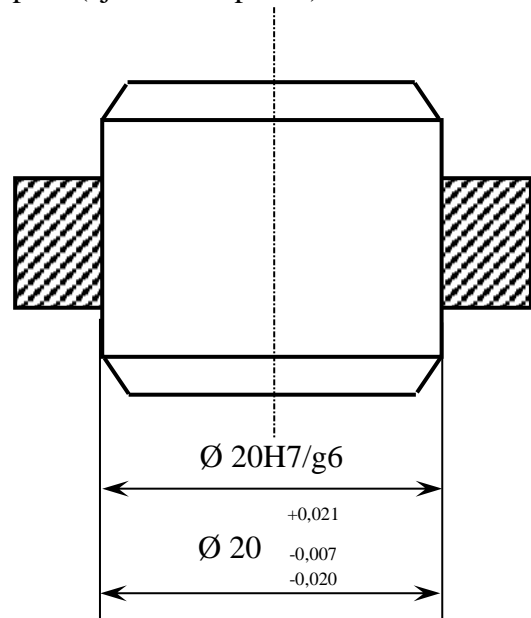


Tableau 4.1. Tableau des ajustements pour l'alésage (en micron)

Alésages	Jusqu'à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
D 10	+ 60	+ 78	+ 98	+ 120	+ 149	+ 180	+ 220	+ 260	+ 305	+ 355	+ 400	+ 440	+ 480
	+ 20	+ 30	+ 40	+ 50	+ 65	+ 80	+ 100	+ 120	+ 145	+ 170	+ 190	+ 210	+ 230
F 7	+ 16	+ 22	+ 28	+ 34	+ 41	+ 50	+ 60	+ 71	+ 83	+ 96	+ 108	+ 119	+ 121
	+ 6	+ 10	+ 13	+ 16	+ 20	+ 25	+ 30	+ 36	+ 43	+ 50	+ 56	+ 62	+ 68
G 6	+ 8	+ 12	+ 14	+ 17	+ 20	+ 25	+ 29	+ 34	+ 39	+ 44	+ 49	+ 54	+ 60
	+ 2	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 9	+ 10	+ 12	+ 14	+ 15	+ 17	+ 18	+ 20
H 6	+ 6	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 16	+ 19	+ 22	+ 25	+ 29	+ 32	+ 36	+ 40
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 7	+ 10	+ 12	+ 15	+ 18	+ 21	+ 25	+ 30	+ 35	+ 40	+ 46	+ 52	+ 57	+ 63
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 8	+ 14	+ 18	+ 22	+ 27	+ 33	+ 39	+ 46	+ 54	+ 63	+ 72	+ 81	+ 89	+ 97
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 9	+ 25	+ 30	+ 36	+ 43	+ 52	+ 62	+ 74	+ 87	+ 100	+ 115	+ 130	+ 140	+ 155
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 10	+ 40	+ 48	+ 58	+ 70	+ 84	+ 100	+ 120	+ 140	+ 160	+ 185	+ 210	+ 230	+ 250
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 11	+ 60	+ 75	+ 90	+ 110	+ 130	+ 160	+ 190	+ 210	+ 250	+ 290	+ 320	+ 360	+ 400
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 12	+ 100	+ 120	+ 150	+ 180	+ 210	+ 250	+ 300	+ 350	+ 400	+ 460	+ 520	+ 570	+ 630
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H 13	+ 140	+ 180	+ 220	+ 270	+ 330	+ 390	+ 460	+ 540	+ 630	+ 720	+ 810	+ 890	+ 970
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J 7	+ 4	+ 6	+ 8	+ 10	+ 12	+ 14	+ 18	+ 22	+ 26	+ 30	+ 36	+ 39	+ 43
	- 6	- 6	- 7	- 8	- 9	- 11	- 12	- 13	- 14	- 16	- 16	- 18	- 20
K 6	0	+ 2	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8
	- 6	- 6	- 7	- 9	- 11	- 13	- 15	- 18	- 21	- 24	- 27	- 29	- 32
K 7	0	+ 3	+ 5	+ 6	+ 6	+ 7	+ 9	+ 10	+ 12	+ 13	+ 16	+ 17	+ 18
	- 10	- 9	- 10	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 28	- 33	- 36	- 40	- 45
M 7	- 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 12	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 30	- 35	- 40	- 46	- 52	- 57	- 63
N 7	- 4	- 4	- 4	- 5	- 7	- 8	- 9	- 10	- 12	- 14	- 14	- 16	- 17
	- 14	- 16	- 19	- 23	- 28	- 33	- 39	- 45	- 52	- 60	- 66	- 73	- 80
N 9	- 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 29	- 30	- 36	- 43	- 52	- 62	- 74	- 87	- 100	- 115	- 130	- 140	- 155
P 6	- 6	- 9	- 12	- 15	- 18	- 21	- 26	- 30	- 36	- 41	- 47	- 51	- 55
	- 12	- 17	- 21	- 26	- 31	- 37	- 45	- 52	- 61	- 70	- 79	- 87	- 95
P 7	- 6	- 8	- 9	- 11	- 14	- 17	- 21	- 24	- 28	- 33	- 36	- 41	- 45
	- 16	- 20	- 24	- 29	- 35	- 42	- 51	- 59	- 68	- 79	- 88	- 98	- 108
P 9	- 9	- 12	- 15	- 18	- 22	- 26	- 32	- 37	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 31	- 42	- 51	- 61	- 74	- 88	- 106	- 124	- 143	- 165	- 186	- 202	- 223

Tableau 4.2. Tableaux des ajustements pour l'arbre (en micron)

Arbres	Jusqu'à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
a 11	- 270	- 270	- 280	- 290	- 300	- 320	- 360	- 410	- 580	- 820	- 1050	- 1350	- 1650
	- 330	- 345	- 370	- 400	- 430	- 470	- 530	- 600	- 710	- 950	- 1240	- 1560	- 1900
c 11	- 60	- 70	- 80	- 95	- 110	- 130	- 150	- 180	- 230	- 280	- 330	- 400	- 480
	- 120	- 145	- 170	- 205	- 240	- 280	- 330	- 390	- 450	- 530	- 620	- 720	- 840
d 9	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 45	- 60	- 75	- 93	- 117	- 142	- 174	- 207	- 245	- 285	- 320	- 350	- 385
d 10	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 60	- 78	- 98	- 120	- 149	- 180	- 220	- 250	- 305	- 355	- 400	- 440	- 480
d 11	- 20	- 30	- 40	- 50	- 65	- 80	- 100	- 120	- 145	- 170	- 190	- 210	- 230
	- 80	- 105	- 130	- 160	- 195	- 240	- 290	- 340	- 395	- 460	- 510	- 570	- 630
e 7	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 24	- 32	- 40	- 50	- 61	- 75	- 90	- 107	- 125	- 146	- 162	- 182	- 198
e 8	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 28	- 38	- 47	- 59	- 73	- 89	- 106	- 126	- 148	- 172	- 191	- 214	- 232
e 9	- 14	- 20	- 25	- 32	- 40	- 50	- 60	- 72	- 85	- 100	- 110	- 125	- 135
	- 39	- 50	- 61	- 75	- 92	- 112	- 134	- 159	- 185	- 215	- 240	- 265	- 290
f 6	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 12	- 18	- 22	- 27	- 33	- 41	- 49	- 58	- 68	- 79	- 88	- 98	- 108
f 7	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 16	- 22	- 28	- 34	- 41	- 50	- 60	- 71	- 83	- 96	- 106	- 119	- 131
f 8	- 6	- 10	- 13	- 16	- 20	- 25	- 30	- 36	- 43	- 50	- 56	- 62	- 68
	- 20	- 28	- 35	- 43	- 53	- 64	- 76	- 90	- 106	- 122	- 137	- 151	- 165
g 5	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 6	- 9	- 11	- 14	- 16	- 20	- 23	- 27	- 32	- 35	- 40	- 43	- 47
g 6	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 8	- 12	- 14	- 17	- 20	- 25	- 29	- 34	- 39	- 44	- 49	- 54	- 60
g 7	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 12	- 16	- 20	- 24	- 28	- 34	- 40	- 47	- 54	- 61	- 69	- 75	- 83
g 8	- 2	- 4	- 5	- 6	- 7	- 9	- 10	- 12	- 14	- 15	- 17	- 18	- 20
	- 16	- 22	- 27	- 33	- 40	- 48	- 56	- 66	- 74	- 87	- 98	- 107	- 117
h 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 4	- 5	- 6	- 8	- 9	- 11	- 13	- 15	- 18	- 20	- 23	- 25	- 27
h 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 6	- 8	- 9	- 11	- 13	- 16	- 19	- 22	- 25	- 29	- 32	- 36	- 40
h 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 10	- 12	- 15	- 18	- 21	- 25	- 30	- 35	- 40	- 46	- 52	- 57	- 63
h 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 14	- 18	- 22	- 27	- 33	- 39	- 46	- 54	- 63	- 72	- 81	- 89	- 97

Arbres	Jusqu'à 3 inclus	de 3 à 6 inclus	de 6 à 10 inclus	de 10 à 18 inclus	de 18 à 30 inclus	de 30 à 50 inclus	de 50 à 80 inclus	de 80 à 120 inclus	de 120 à 180 inclus	de 180 à 250 inclus	de 250 à 315 inclus	de 315 à 400 inclus	de 400 à 500 inclus
h 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 25	- 30	- 36	- 43	- 52	- 62	- 74	- 87	- 100	- 115	- 130	- 140	- 155
h 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 40	- 48	- 58	- 70	- 84	- 100	- 120	- 140	- 160	- 185	- 210	- 230	- 250
h 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 60	- 75	- 90	- 110	- 130	- 160	- 190	- 230	- 250	- 290	- 320	- 360	- 400
h 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	- 140	- 180	- 220	- 270	- 330	- 390	- 460	- 540	- 630	- 720	- 810	- 890	- 970
j 6	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 11	+ 12	+ 13	+ 14	+ 16	+ 16	+ 18	+ 20
	- 2	- 2	- 2	- 3	- 4	- 5	- 7	- 9	- 11	- 13	- 16	- 18	- 20
js 5	± 2	± 2,5	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 7,5	± 9	± 10	± 11,5	± 12,5	± 13,5
js 6	± 3	± 4	± 4,5	± 5,5	± 6,5	± 8	± 9,5	± 11	± 12,5	± 14,5	± 16	± 18	± 20
js 9	± 12	± 15	± 18	± 21	± 26	± 31	± 37	± 43	± 50	± 57	± 65	± 70	± 77
js 11	± 30	± 37	± 45	± 55	± 65	± 80	± 95	± 110	± 125	± 145	± 160	± 180	± 200
k 5	+ 4	+ 6	+ 7	+ 9	+ 11	+ 13	+ 15	+ 18	+ 21	+ 24	+ 27	+ 29	+ 32
	0	+ 1	+ 1	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5
k 6	+ 6	+ 9	+ 10	+ 12	+ 15	+ 18	+ 21	+ 25	+ 28	+ 33	+ 36	+ 40	+ 45
	0	+ 1	+ 1	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5
k 7	+ 10	+ 13	+ 16	+ 19	+ 23	+ 27	+ 32	+ 38	+ 43	+ 50	+ 56	+ 61	+ 68
	0	+ 1	+ 1	+ 1	+ 2	+ 2	+ 2	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	+ 4	+ 5
m 5	+ 6	+ 9	+ 12	+ 15	+ 17	+ 20	+ 24	+ 28	+ 33	+ 37	+ 43	+ 46	+ 50
	+ 2	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 15	+ 17	+ 20	+ 21	+ 23
m 6	+ 8	+ 12	+ 15	+ 18	+ 21	+ 25	+ 30	+ 35	+ 40	+ 46	+ 52	+ 57	+ 63
	+ 2	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 15	+ 17	+ 20	+ 21	+ 23
m 7	+ 12	+ 16	+ 21	+ 25	+ 29	+ 34	+ 41	+ 48	+ 55	+ 63	+ 72	+ 78	+ 86
	+ 2	+ 4	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9	+ 11	+ 13	+ 15	+ 17	+ 20	+ 21	+ 23
n 6	+ 10	+ 16	+ 19	+ 23	+ 28	+ 33	+ 39	+ 45	+ 52	+ 60	+ 66	+ 73	+ 80
	+ 4	+ 8	+ 10	+ 12	+ 15	+ 17	+ 20	+ 23	+ 27	+ 31	+ 34	+ 37	+ 40
p 6	+ 12	+ 20	+ 24	+ 29	+ 35	+ 42	+ 51	+ 59	+ 68	+ 79	+ 88	+ 98	+ 108
	+ 6	+ 12	+ 15	+ 18	+ 22	+ 26	+ 32	+ 37	+ 43	+ 50	+ 56	+ 62	+ 68
p 7	+ 16	+ 24	+ 30	+ 36	+ 43	+ 51	+ 62	+ 72	+ 83	+ 96	+ 108	+ 119	+ 131
	+ 6	+ 12	+ 15	+ 18	+ 22	+ 26	+ 32	+ 37	+ 43	+ 50	+ 56	+ 62	+ 68

Le Tableau 4.3 présente des exemples de choix des lettres d'ajustement (position de tolérance) en fonction des liaisons mécaniques les plus utilisées.

Le choix des chiffres d'ajustement (qualité de tolérance) est présenté dans le Tableau 4.4). Le chiffre représente l'intervalle de tolérance, donc la classe de précision de l'ajustement. En principe l'arbre et l'alésage doivent être de la même qualité (Ex : Ø 30 H7/f7). Toutefois un Point de moins peut être accepté pour l'arbre car il est plus facile de faire un arbre précis qu'un alésage (Ex : Ø 30 H7/f6).

Tableau 4.3. Choix des lettres d'ajustement en fonction des liaisons mécaniques entre arbre et alésage

Mouvement Transmission de l'effort	Caractère de la liaison	Montage	Système à alésage Normal	Système à arbre normal	Jeu
Mouvement possible	Ajustement libre, le guidage est très peu précis	à la main	H - e	E - h	important
	Guidage en rotation	à la main	H-f	F-h	petit
	Guidage en translation	à la main	H - g	G - h	petit
Pas de mouvement pas d'effort	Positionnement précis démontable	à la main	H - h	H - h	très petit
	Positionnement précis démontable	au maillet	H - js	Js - h	Incertain jeu ou serrage
	Positionnement très précis démontable 4 à 5 fois	au maillet	H - k H-m	K - h M-h	
Pas de mouvement effort modéré	Positionnement très précis et définitif. Le démontage est possible avec détériorations des surfaces	À la presse hydraulique ou à vis	H - n	N - h	incertain
			H - p	P - h	serrage environ 0,02 mm
Pas de mouvement effort important	Ajustement dit « fretté » : l'arbre est refroidi dans l'azote liquide (-195°C), l'alésage est chauffé dans un bain d'huile (+200°C)		H-s	S-h	serrage de plus de 0.04 mm

Tableau 4.4. Choix des chiffres d'ajustement en fonction de la précision mécanique

01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Appareils de mesures				Qualité mécanique courante				Mécanique grossière pour des liaisons sans précision ou sans mouvements ou pour des surfaces non fonctionnelles												
Pour des fonctions mécaniques très spécifiques : matériels de laboratoire, médicaux, optique de précisions ...				Mécanique très précise				Mécanique peu précise, mouvements lents ou de faible amplitude ou peu fréquents												

Le tableau ci-dessus est donné à titre indicatif. La précision doit être réalisée à bon escient. Pour déterminer cette dernière il faut faire des calculs, et pour la grande série, il faut réaliser des essais sur des prototypes.

3. 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). Une tolérance générale de $\pm 0,1$ peut être inscrite pour toutes les cotes sans tolérance.

4.2.2.2 Spécifications géométriques

Les cotes d'une pièce sont toujours inscrites avec des 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 géométriquement. A cet effet, la pièce doit satisfaire également à d'autres exigences géométriques pour prendre en considération les défauts de forme et de position, car ils influent sur le contact entre les pièces [7-8].






Dans ce qui suit, les usuelles tolérances de forme et de position sont présentées à l'aide de dessins explicatifs avec les signes conventionnels.

1. Tolérances de forme

Selon l'aspect géométrique d'une pièce, les défauts de forme concernent une seule propriété, telle que [7] :

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

Tableau 4.5. Tableau des tolérances de forme [7]







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

2. Tolérances de position

Tandis que les défauts de position concernent une relation entre deux éléments géométriques de la pièce [7] :

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

Tableau 4.6. Tableau des tolérances de position [7]

					
Localisation	Coaxialité	Symétrie	Perpendicularité	Parallélisme	Inclinaison

Exemples	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 0,02mm. 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 80mm, doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05mm. 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 0,02mm. 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 0,05mm. Le cylindre extérieur est le plus petit cylindre circonscrit.</p>		

Figure 4.2. Exemples sur les tolérances de forme

Exemples	Illustration de la tolérance	Application
<p>Parallélisme</p> <p>La surface, indiquée par flèche, doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05mm et parallèles au plan de référence A.</p>		
<p>Perpendicularité</p> <p>La surface, indiquée par flèche, doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05mm et perpendiculaires au plan de référence A.</p>		

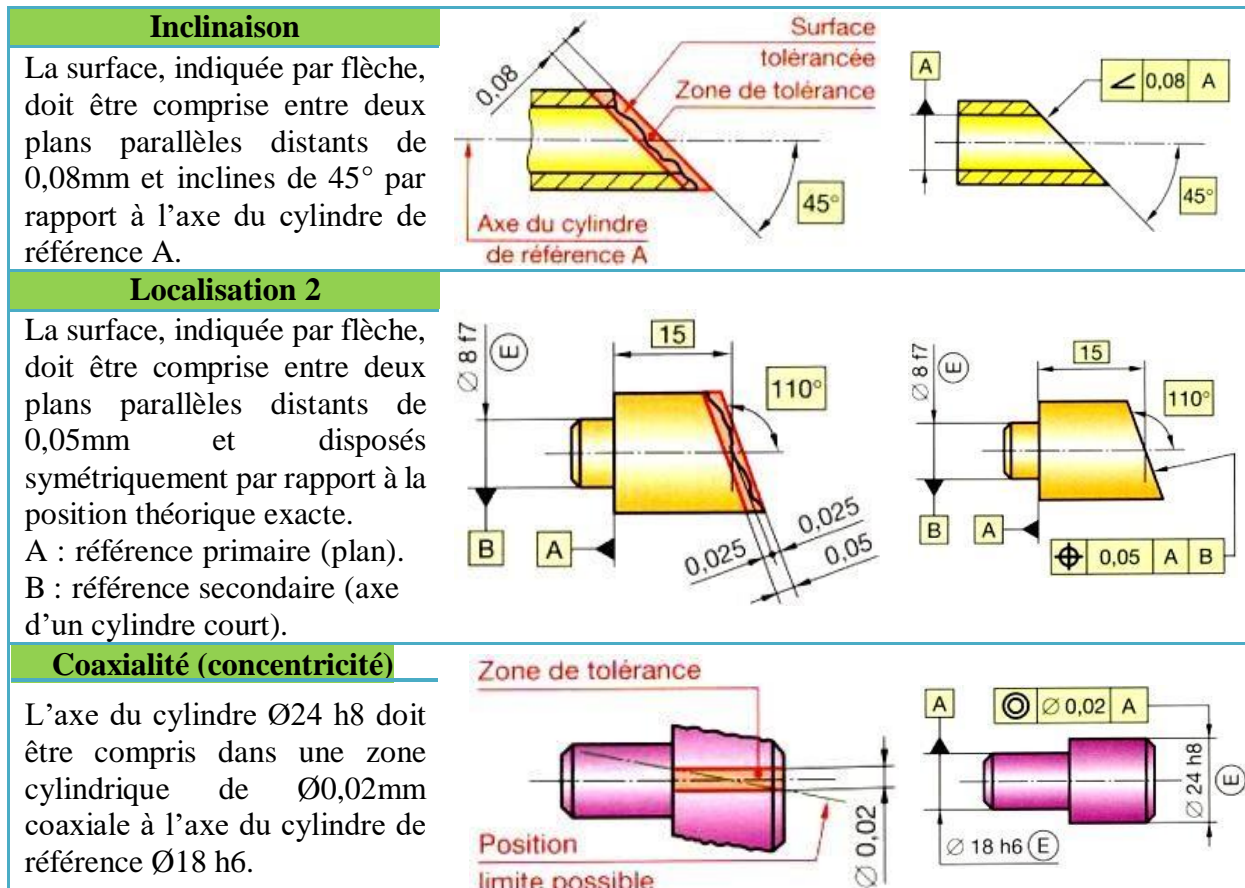


Figure 4.3. Exemples sur les tolérances de position

4.2.2.3 Spécifications d'état de surface

En plus des spécifications dimensionnelles et géométriques, il existe les spécifications d'état de surface.

1. Définition

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 [8] :

- l'ondulation,
- et la rugosité.

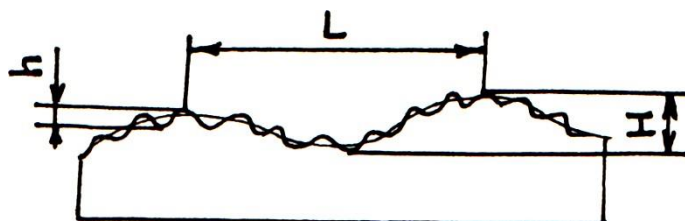


Figure 4.4. Représentation de l'ondulation et de la rugosité d'une surface

Si :

$L/H = 50 \text{ à } 1000$ on a une ondulation

$L/H < 50$ on a une rugosité

Avec : L la longueur d'onde, H la hauteur d'onde et h la hauteur de rugosité.

La rugosité ou l'état de surface est caractérisé par des défauts de surface de très petites amplitudes ou défauts micro géométriques (Figure 3-4).

2. Inscription de la rugosité

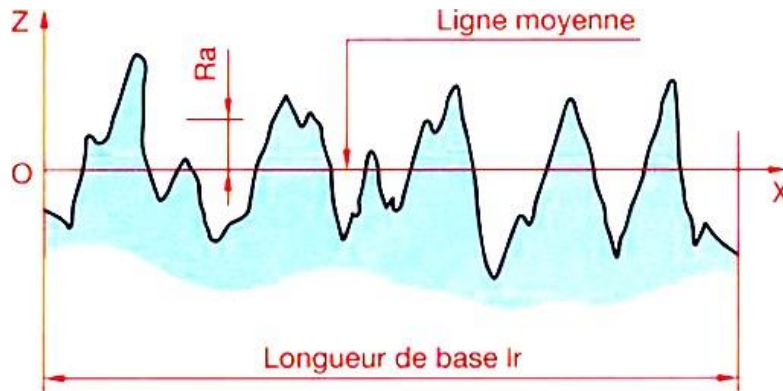


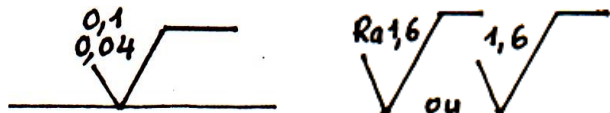
Figure 4.5. Caractéristiques d'un état de surface

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 rugosité retenue comme limite admissible [8].

$0,04 < Ra < 0,10$



4.3 Méthodes de mesure et de contrôle

4.3.1 Contrôle direct des dimensions

En mécanique de fabrication, la mesure ou le contrôle direct est une lecture directe de la valeur d'une dimension d'une pièce à l'aide d'instrument portant une graduation (règle graduée, pied-à-coulisse, micromètre, ...).

4.3.1.1 Pied à coulisse (Calibre 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 3-6) [6]. 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).

1. Précision de mesures

Le pied à coulisse comporte un vernier, gravé sur le coulisseau, a une graduation particulière dont le nombre de divisions détermine la précision de lecture du calibre à coulisse [6] :

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

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.

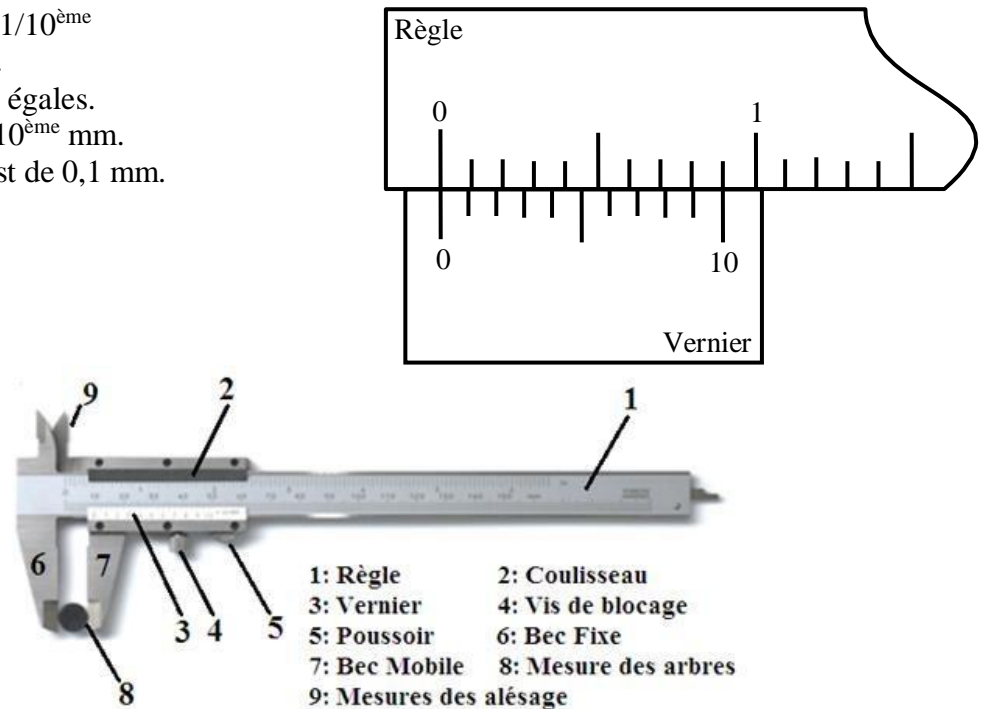


Figure 4.6. Composantes du pied à coulisse

2. 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.

3. Catégories de pied à coulisse

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

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



Figure 4.7. Pied à coulisse à vernier

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

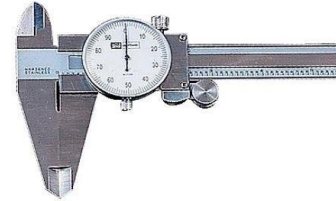


Figure 4.8. Pied à coulisse à montre

- Les pieds à coulisse à lecture digitale permettent 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).



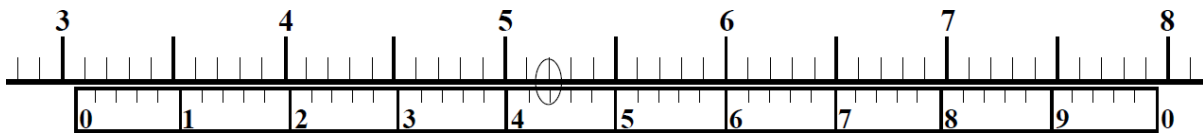
Figure 4.9. Pied à coulisse à lecture digitale

- La jauge de profondeur est une variante du pied à coulisse. Elle permet la mesure des profondeurs et la méthode de lecture utilisée est strictement identique au pied à coulisse.

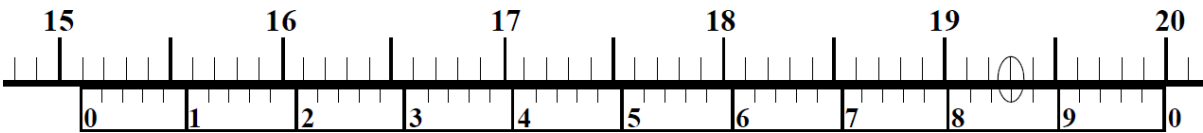


Figure 4.10. Pied de profondeur

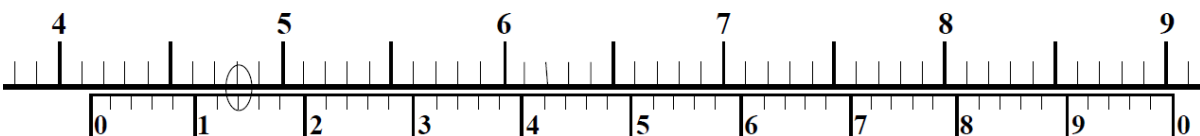
Exercices de lecture



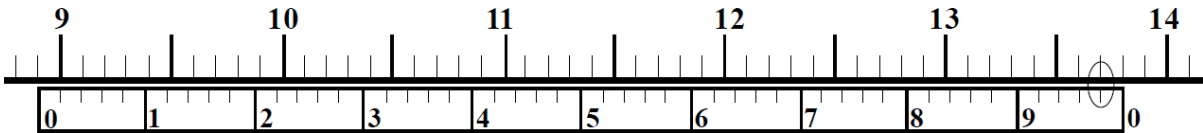
Lecture :



Lecture :



Lecture :



Lecture :

4.3.1.2 Micromètre (Palmer)

1. Description [9]

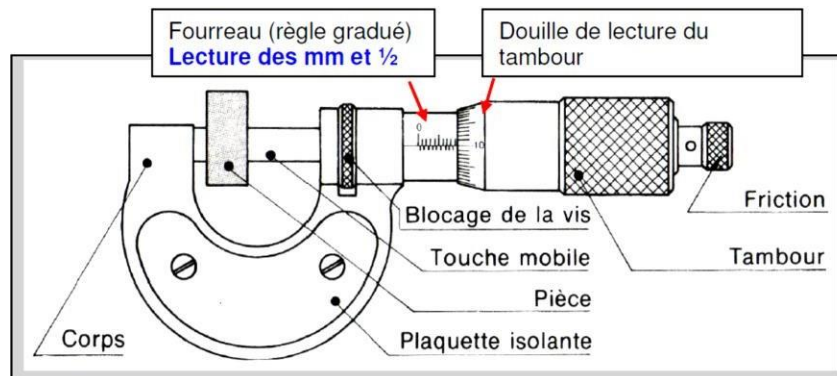


Figure 4.11. Constitution d'un micromètre

Le micromètre se compose de :

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

2. Précision de mesure

Le micromètre (Figure 3-12) est un instrument beaucoup plus précis que le pied 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 [6].

D'autre part [6],

- Les erreurs résultant de l'inégalité de pression de l'appareil sur les pièces à mesurer sont 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 $1/100^{\text{ème}}$ de mm

nécessite la rotation de la douille de la valeur d'une division, équivalent environ à 1 mm en longueur développée.

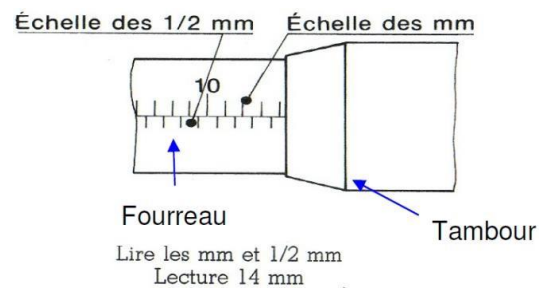


Figure 4.12. Micromètre (palmer)

3. Principe de lecture [10]

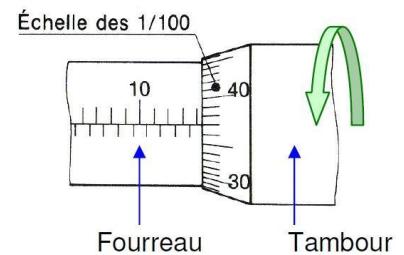
1^{ère} étape : la lecture des millimètres

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 1/100^{ème} de mm (0.01mm)

La lecture des 1/100 de mm s'effectue sur le tambour gradué.
Le relevé de l'échelle des 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 sur le tambour est de 0,37mm. —→ La lecture générale est de $14 + 0,37 = 14,37\text{mm}$.



Exemple :

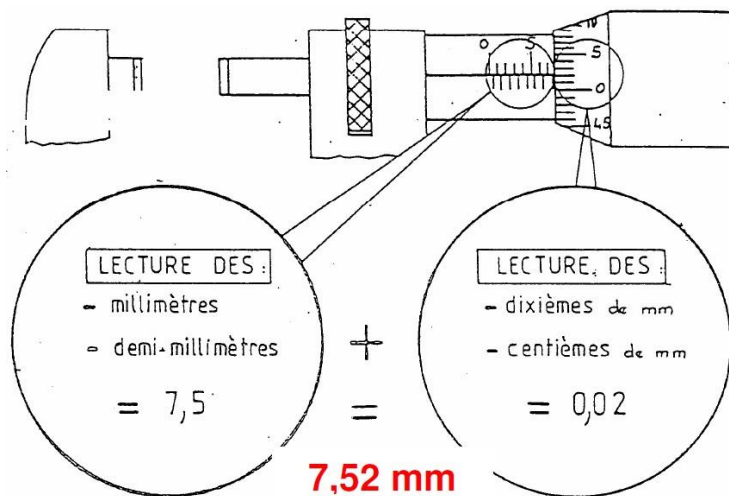


Figure 4.13. Exemple de lecture dans un micromètre

4. Catégories de micromètre

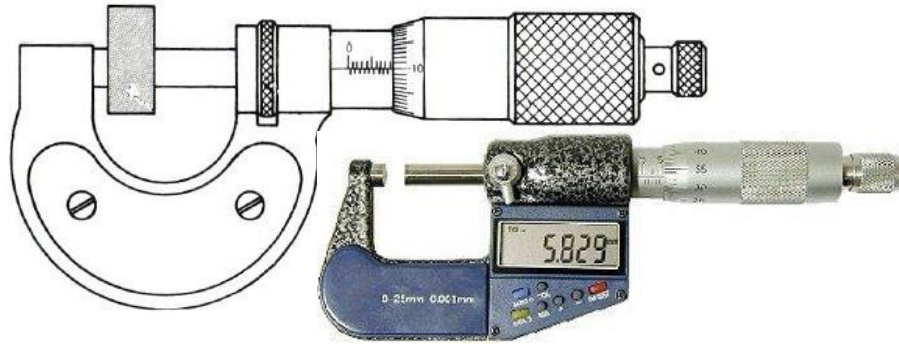


Figure 4.14. Micromètre universel

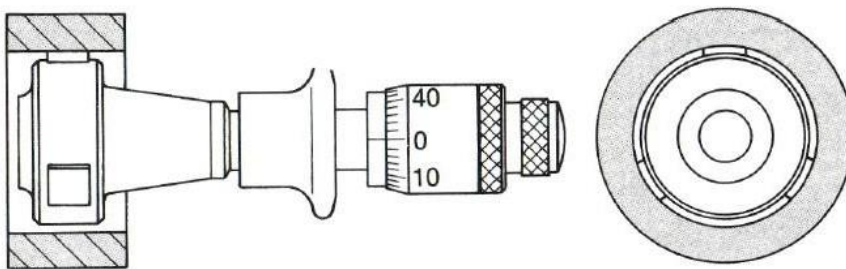


Figure 4.15. Micromètre d'intérieur à trois touches

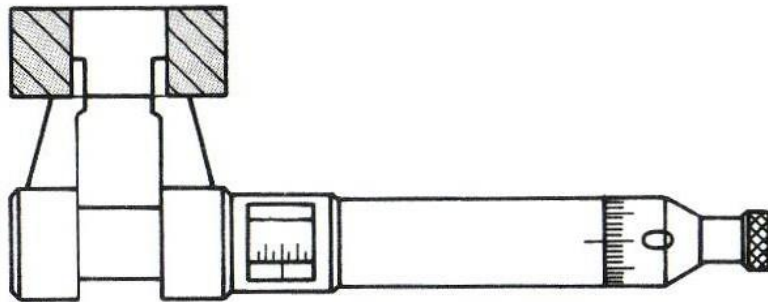


Figure 4.16. Micromètre d'intérieur à becs [8]

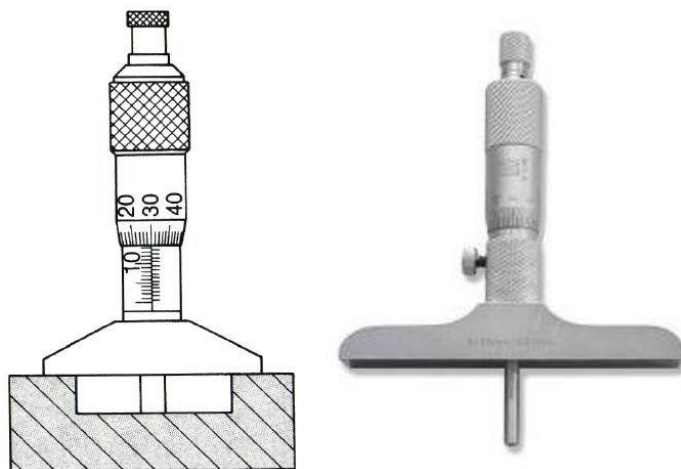
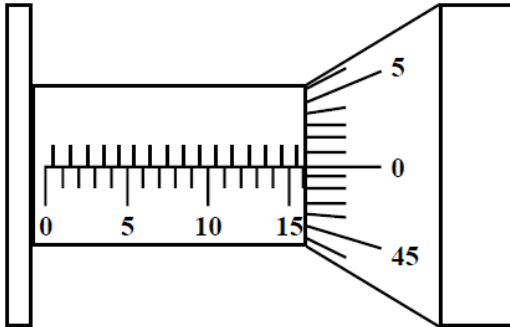


Figure 4.17. Jauge de profondeur micrométrique [10]

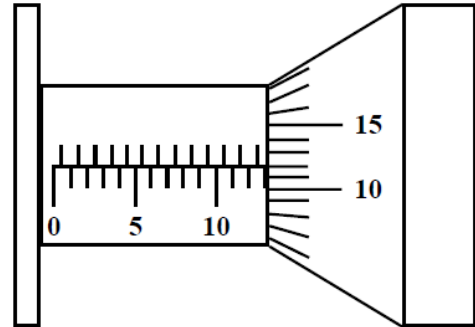
Il existe d'autres types de micromètre à utilisation spécifique, tel que [11] :

- Micromètre avec comparateur,
- Micromètres pour mesurer les engrenages, les filetages et/ou taraudage,
- Micromètre à prisme, ...

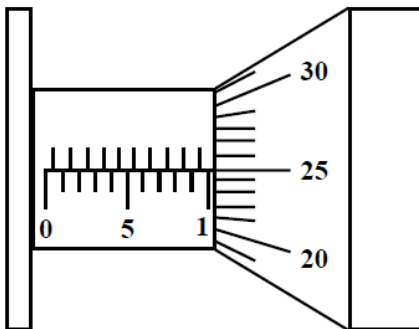
Exercices de lecture



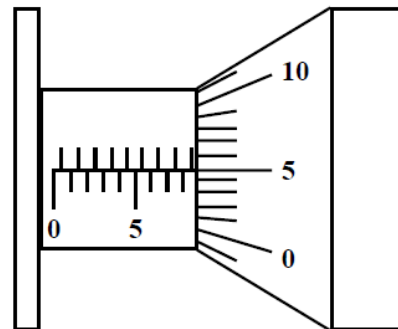
Lecture :



Lecture :



Lecture :



Lecture :

4.3.2 Contrôle indirect ou par comparaison

La grandeur à mesurer, cette fois, 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 ...)

4.3.2.1 Comparateurs

1. Généralités

Les comparateurs ou amplificateurs sont des appareils de mesure de longueur. Ils n'indiquent pas une mesure absolue mais une mesure relative par rapport à un point de

référence. Ils 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 [6]. Dans la catégorie des comparateurs mécanique, le comparateur à cadran est le plus utilisé. Ce dernier fait l'objet de ce cours (Figure 3-18).



Figure 4.18. Comparateur à cadran

2. Description et lecture

Le comparateur à cadran est constitué de :

- une grande aiguille commandée par le palpeur. Un tour de cette aiguille égal à une différence de 1 mm ;
- un grand cadran divisé en 100 parties égales à $1/100^{\text{ème}}$ de mm (Il existe également des comparateurs à cadran permettant une lecture de $1/1000^{\text{ème}}$ de mm) ;
- un petit cadran (totaliseur) qui indique le nombre de tours de la grande aiguille ;
- l'ensemble de la grande graduation (lunette) qui peut tourner autour de l'axe de la montre, afin que la division "zéro" puisse être mise à volonté devant l'aiguille centrale.



Figure 4.19. Support du comparateur [12]

3. Utilisation [12]

En montant un comparateur à cadran sur une base appropriée (exemple de la Figure 4.19) et avec divers accessoires, il peut être utilisé à diverses fins, comme suit :

- Détermination des erreurs géométriques de forme, par exemple, cylindricité, conicité, rectitude d'une ligne ...
- Détermination des erreurs géométriques de position, par exemple, le parallélisme ...
- Prendre des mesures précises de la déformation lors des essais de traction et de compression du matériau.
- Comparer deux distances ou hauteurs.

Les applications pratiques de l'utilisation du comparateur à cadran sont les suivantes :

- vérification des alignements dans la machine de tournage ;
- vérification de la justesse des arbres de la fraiseuse ;
- vérification du parallélisme du vérin de façonnage avec la surface de la table.

4. Exemple d'utilisation (mesure d'un écart de rectitude)

Pour mesurer un écart de rectitude, 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 la rectitude 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.

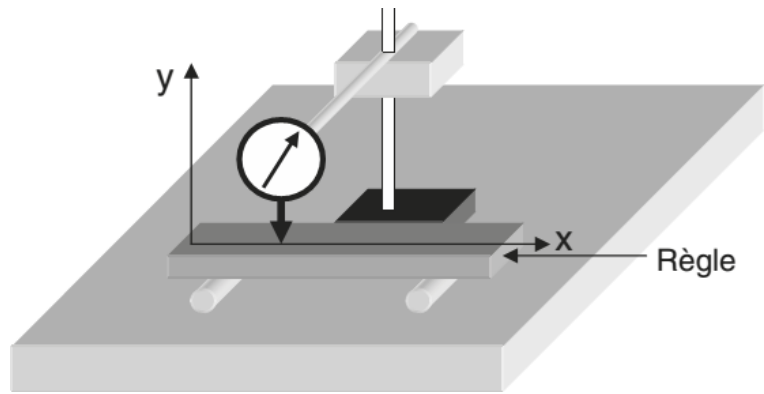


Figure 4.20. Principe de mesure d'un écart de rectitude avec un comparateur

4.3.2.2 Vérificateurs à tolérances

Les vérificateurs à tolérance (Figure 3-21) 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" ».



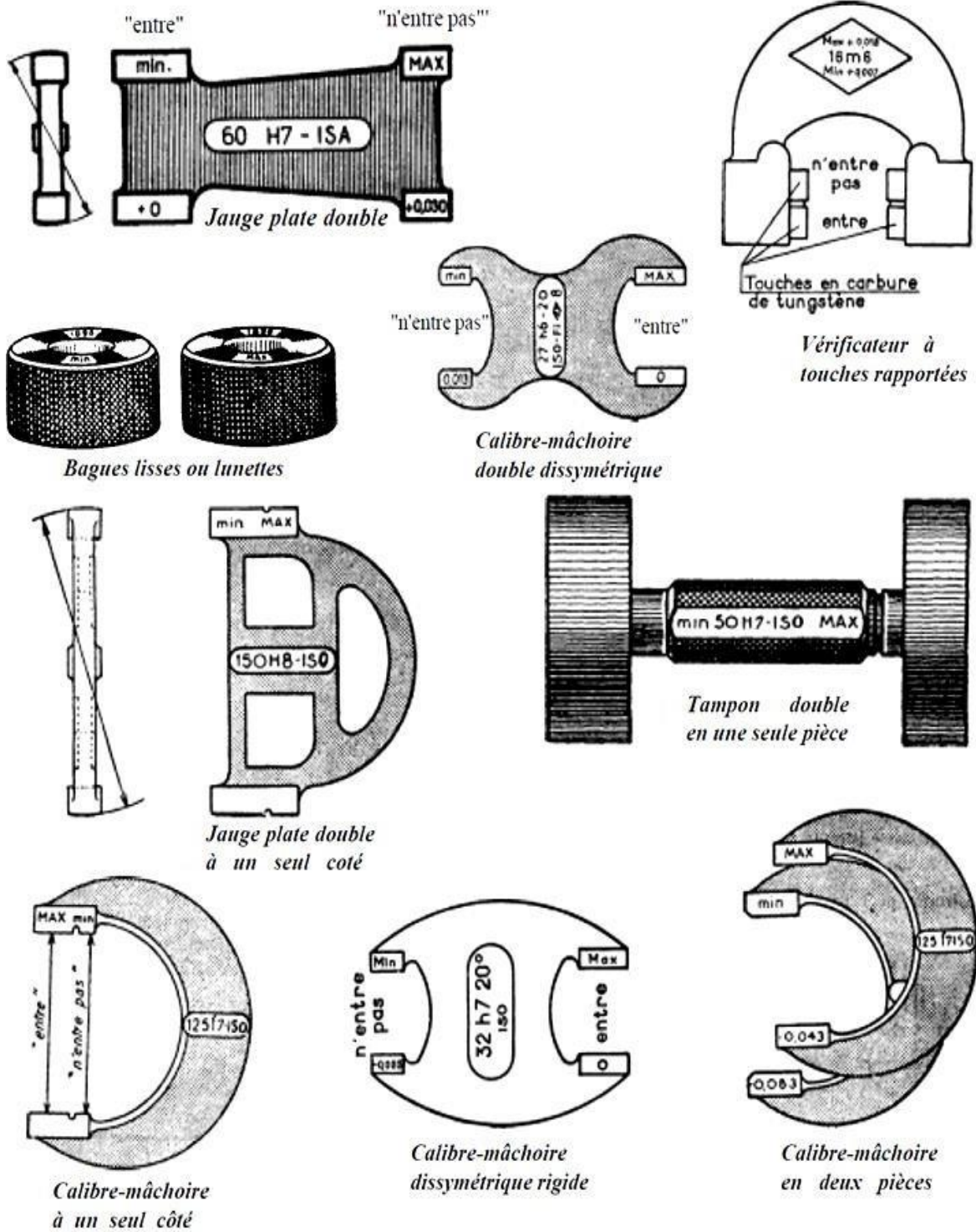


Figure 4.21. Vérificateurs à tolérances

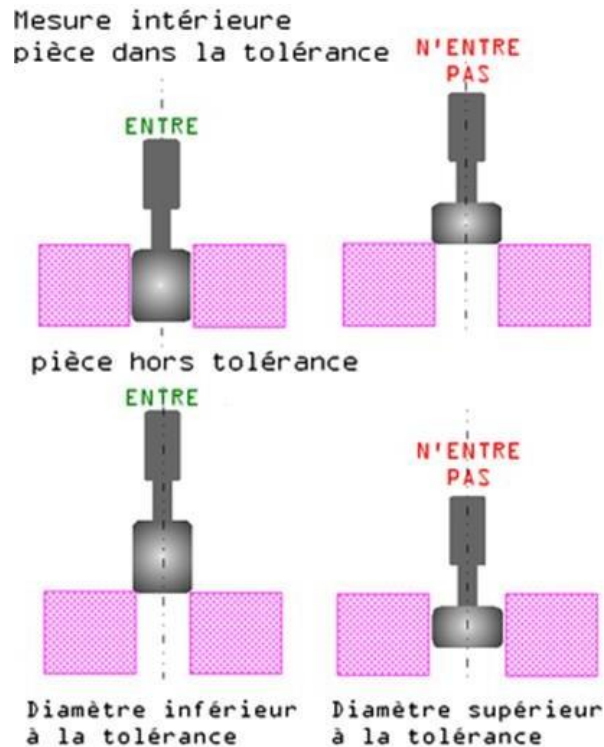


Figure 4.22. Principe de vérification

Tous les vérificateurs à tolérances sont normalisés par ISO et les organismes de normalisation en métrologie (paragraphe §1.3). Parmi ces vérificateurs, on peut citer :

1. Tampon lisse simple et bague lisse

Les tampons lisses simples et bagues lisses, figure ci-contre, sont d'utilisation spécifique dans les industries de fabrication à production de masse et/ou continue. Ces deux types de contrôle sont employés pour s'assurer des tolérances dimensionnelles des alésages et des arbres (axes) de forme cylindrique. La vérification est basée sur le principe « La pièce "entre" ou "n'entre pas" » (Figure 3-22). La qualité de l'ajustage (glissant, tournant, tournant libre, etc.) doit être appréciée par un contrôleur. Cette méthode n'est plus d'actualité. En effet, pour contrôler un arbre, il faudrait deux bagues, l'une ayant la cote « entre », l'autre la cote « n'entre pas ». On constate la même chose concernant les tampons pour contrôler les alésages [11].



Figure 4.23. Tampons lisses simples et bagues lisses

2. Tampon fileté simple et bague filetée

Les tampons filetés et bagues filetés, Figure 3.24, sont aussi pour les grandes productions. Ils sont employés pour contrôler les tolérances dimensionnelles des filetages et taraudages. Le même principe « pièce "entre" ou "n'entre pas" » est employé.

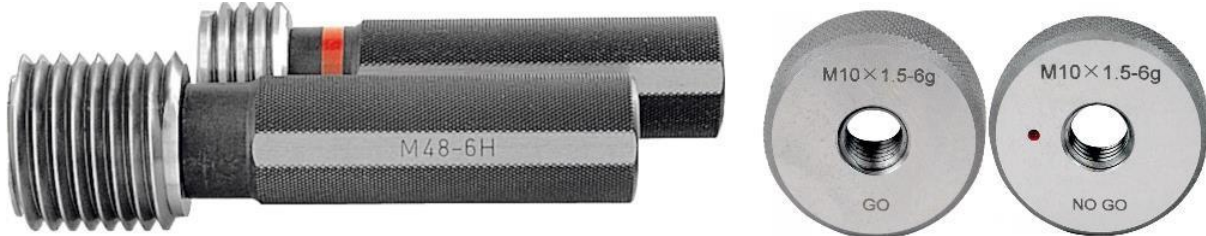


Figure 3.24. Tampons filetés simples et bagues filetées

3. Tampon lisse double

Les tampons lisses doubles (Figure 3-25) sont plus faciles à employer que l'utilisation de deux tampons simples. Ils sont d'utilisation large dans les industries, et sont employés pour vérifier la tolérance des alésages.



Figure 4.25. Tampon lisse double

4. Tampon fileté double

Les tampons filetés doubles sont aussi très utilisés dans les industries des pièces mécaniques, et sont employés pour vérifier la tolérance des taraudages.



Figure 4.26. Tampon fileté double

5. Jauge plate double

Elle permet, comme le tampon lisse double, un contrôle des alésages, avec la possibilité supplémentaire du contrôle des entrées et des rainures.



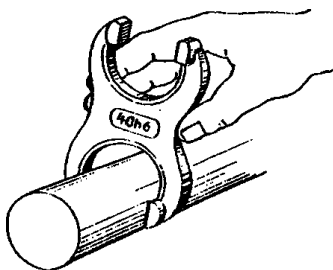
Figure 4.27. Jauge plate double

6. Jauge plate double

Les calibres à mâchoires, aussi nommés Jauges à fourches (Figure 3-28), sont utilisés pour le contrôle d'axes ou de pièces similaires qui, s'ils sont exécutés dans les limites imposées, permettront un montage sans retouche [11]. La figure ci-dessous montre la méthode de contrôle d'un arbre.



Figure 4.28. Calibre à mâchoires



Les calibres à mâchoires permettent de garantir et de maintenir l'interchangeabilité en tout temps. La différence d'éclatement des mâchoires de la jauge, entre le côté « entre » et le côté « n'entre pas » se nomme la tolérance. Les faces de l'ouverture du calibre sont planes et parallèles. Elles sont rodées [11].

7. Calibre mâchoires à touches réglables

Les calibres mâchoires réglables sont aussi nommés Jauges à fourches réglables (Figure 3-29). Les mâchoires « entre » et « n'entre pas » se font suite, ce qui accélère le contrôle. Le réglage de l'écartement se fait par les vis à pas fin [11].



Figure 4.29. Calibre mâchoire à touches réglables

4.3.3 Mesure et contrôle des états de surface

4.3.3.1 Profilomètres

Il existe des appareils appelés profilomètres qui permettent de récupérer, sous la forme d'un signal électrique, un profil appartenant à une surface quelconque (Figure 3-30). L'analyse du signal obtenu permettra par la suite de quantifier ce profil [13].

La saisie du profil consiste à déplacer un palpeur le long de ce profil et d'en mesurer les déplacements verticaux en fonction de sa position horizontale. Elle se fait soit par un procédé tactile soit par un procédé optique. La pointe du palpeur est montée sur un système sans friction. L'exploration du profil se fait en déplaçant le palpeur dans la direction générale du profil, selon le type des appareils utilisés les écarts verticaux sont mesurés, soit par rapport à une référence externe idéale (Figure 3-31-a), soit à partir de l'enveloppe du profil mesuré (Figure 3-31-b) [13].

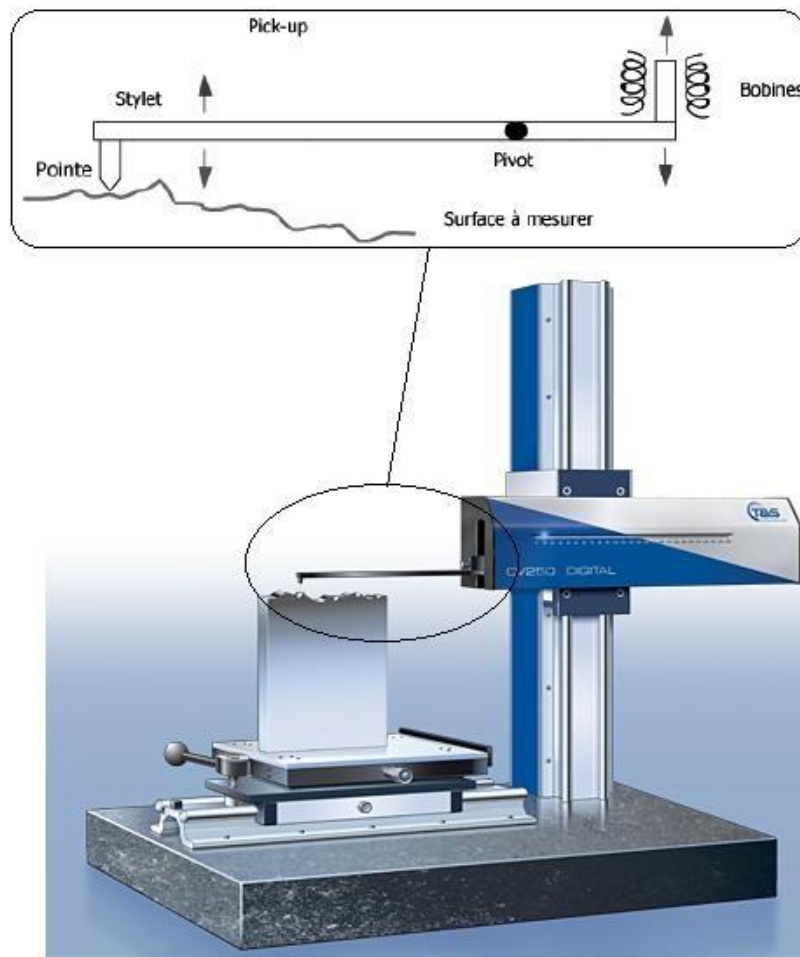


Figure 4.30. Profilomètres

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, ainsi le profil $Z=f(X)$ de la surface est établi (Figure 4.32).

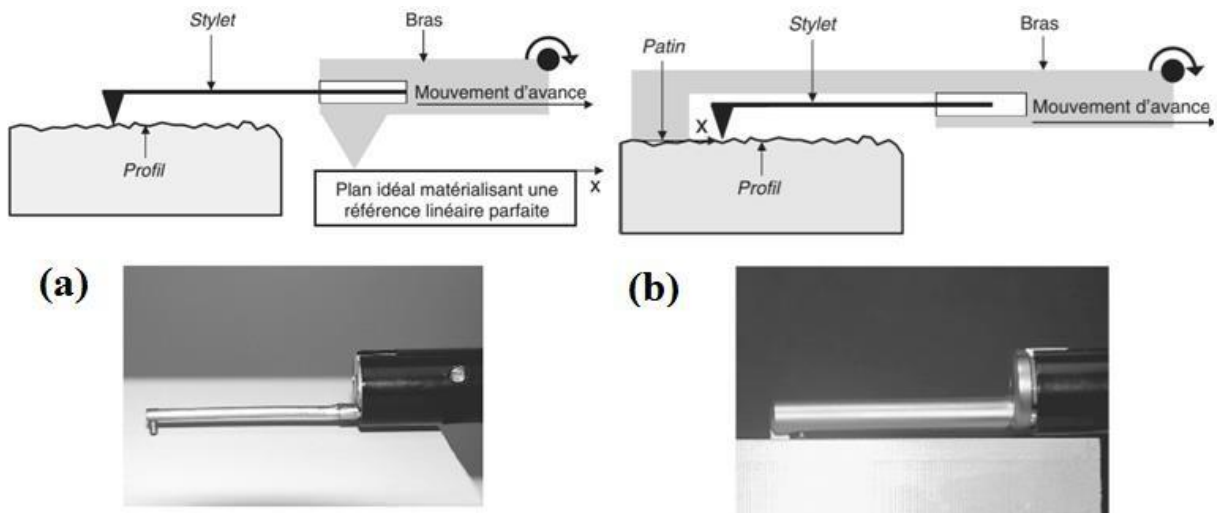


Figure 4.31. Saisie d'un profil à partir : (a) d'une référence externe – (b) d'une référence interne [13]

Les écarts dus aux irrégularités d'un profil sont généralement très faibles (quelques microns, parfois moins). Le rôle du capteur sera de les transformer en signaux électriques afin de pouvoir les amplifier puis de pouvoir les traiter et d'être ainsi en mesure de calculer des paramètres permettant de caractériser ce profil. On retrouve les technologies d'amplification habituellement utilisées pour les mesures de longueurs dans les capteurs de mesure d'état de surface. 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.

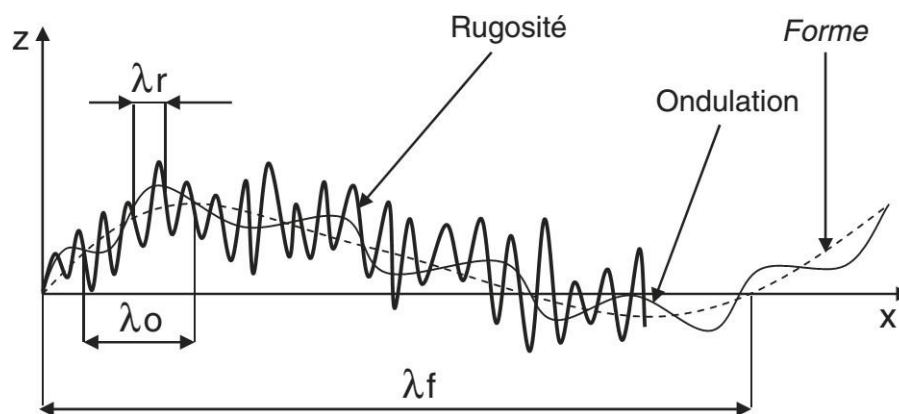


Figure 4.32. Profil général $Z=f(X)$ obtenu par un profilomètre [13]

4.3.4 Étalonnage

4.3.4.1 Étalons

Un étalon est une matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude (Figure 3-33). Certains auteurs le considèrent comme une réalisation de la définition d'une grandeur donnée, avec une valeur déterminée et une incertitude de mesure

associée, utilisée comme référence.



Figure 4.33. Etalons de métrologie [14]

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.

1. Différents types d'étalon [14]

Commençant par les étalons de type cylindriques (Bague ou Tampon) qui servent à étalonner des instruments qui mesurent la même grandeur, il existe deux types principaux suivant les normes NF E 11.011 et NF E 11.012 :

- Les étalons de type « A » : ces étalons sont utilisés pour l'étalonnage d'appareils comportant plus de 2 touches (micromètre d'intérieur, tampon pneumatique ...) ou mesurant dans différents plans. Ces étalons se distinguent notamment par une tolérance géométrique plus petite que ceux de type « B ».

Par exemple, une bague de 10 mm type « A » en qualité 1 doit une tolérance de cylindricité de 0,5 μm alors qu'une bague de type « B » en qualité 1 à avoir une cylindricité de 2 μm .

- Les étalons de type « B » : ces étalons sont utilisés pour l'étalonnage d'appareils ayant 2 touches ou mesurant dans un seul plan. Dans ce cas, l'axe de mesure doit être matérialisé sur l'étalon par un trait. La cote de référence gravée sur la bague indique ainsi que la position de mesure est dans l'axe au milieu de la bague.
- Les qualités 0, 1, 2, 3 : Dans les deux cas (bague ou tampon), la qualité précise la tolérance de réalisation de la dimension du cylindre. Le cas de la qualité « 0 » est particulier : l'intervalle de tolérance est grand ($\pm 200 \mu\text{m}$) mais les tolérances géométriques très petites

(0,35 µm type « A » ou 0,6 µm type « B »). Dans ce cas de figure, la dimension gravée constitue la valeur de référence.

Les piges étalons sont utilisées en règles générales en tant que moyen auxiliaire aux appareils de mesure pour le contrôle de pièces (engrenage, cannelure, filetage) ou contrôle de diamètre. Plusieurs classes sont prévues par la norme NF E 11.017 :

- Classe 1, 2, 3 : pour la vérification de produits.
- Classe K : réservée à la vérification des calibres filetés.

Pour les étalons de type parallélépipédique (Cales étalons), il existe plusieurs qualités ou classes (K, 0, 1, 2) définissant la précision ainsi que la géométrie de la cale.

- Classe « K » : classe prévue pour l'étalonnage d'autres cales étalons.
- Classe « 0 » : classe utilisée en général pour constituer les étalons de référence de l'entreprise.
- Classe « 1 » : Classe utilisée pour des étalons de référence ou de travail (suivant la précision des produits fabriqués par l'entreprise).
- Classe « 2 » : Classe utilisée pour des étalons de travail.

2. Matériaux [14]

Les matériaux utilisés dans la fabrication des étalons sont généralement les aciers 100C6, Z155CVD12.1, K100 (X210Cr12), et du carbure. La dureté superficielle des surfaces est de 670 HV30 minimum pour les bagues, tampons, piges et de 800 HV30 minimum pour les cales étalons. Chaque type de matière confère aux étalons des propriétés particulières suivant leur utilisation.

4.3.4.2 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 » [3].

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, 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). Un appareil de mesure quel qu'il soit doit toujours être vérifié et étalonné avant son utilisation.

Concrètement, étalonner un appareil consiste à placer une grandeur étalon, c'est-à-dire une grandeur considérée comme rigoureusement exacte, connue sous son capteur et à lui faire afficher la valeur de cette grandeur. Un appareil de mesure correctement utilisé est donc parfaitement juste à son point d'étalonnage [13].

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, ...
- l'analyse de la répétabilité des résultats de mesures, ou la comparaison avec des données déjà obtenues.

Références bibliographiques

- [1]. G. SABATIER, al Ed. Dunod. « Manuel de technologie mécanique ».
- [2]. C. BARLIE, Ed. Casteilla. « Memotech : productique matériaux et usinage ».
- [3]. N. MILLET, ed. Casteilla. « Sciences industrielles ».
- [4]. D. BAUR, al Ed. Casteilla. « Memotech : Technologies industrielles ».
- [5]. A. CHEVALIER, Ed. Delagrave. « Métrologie dimensionnelle ».
- [6]. R. JOLYS, R. LABELL et Ed. Delagrave. « Perçage, fraisage ».
- [7]. P. PADELLA, Ed. Dunod. « Guide des fabrications mécaniques »
- [8]. S. Bensaada, d. Ed FELIACHI. « Technologie : première partie ». OPU Alger.
- [9]. S. Bensaada, D. Feliachi. « Le dessin technique, deuxième partie : Le dessin industriel ». Edition O.P.U, 1994.
- [10]. A. Chevalier. « Guide du dessinateur industriel ». édition Hachette, 2004.
- [11]. F. Taillade. « Notions de métrologie ». cel-00564306, version 1, 2011.
- [12]. I. ZIDANE. « Polycopié de cour : Métrologie ». Université de Hassiba benbouali. Chelef, 2019.
- [13]. M. PRIEL. « Vocabulaire de la métrologie ». Techniques de l'ingénieur, R115, 2010.
- [14]. M. Dursapt. « Aide-mémoire Métrologie dimensionnelle ». Edition Dunod, Paris, France, 2009.
- [15]. A. KAOUKA. « Cours de Métrologie ». Université de Amar Telidji Laghouat, 2015.
- [16]. « Le Système International d'Unités ». Bureau International des Poids et Mesures – Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre, 8^{ème} Edition 2006.
- [17]. M. FRIJA. « Métrologie et Appareils de Mesure ». Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse, Tunisie.