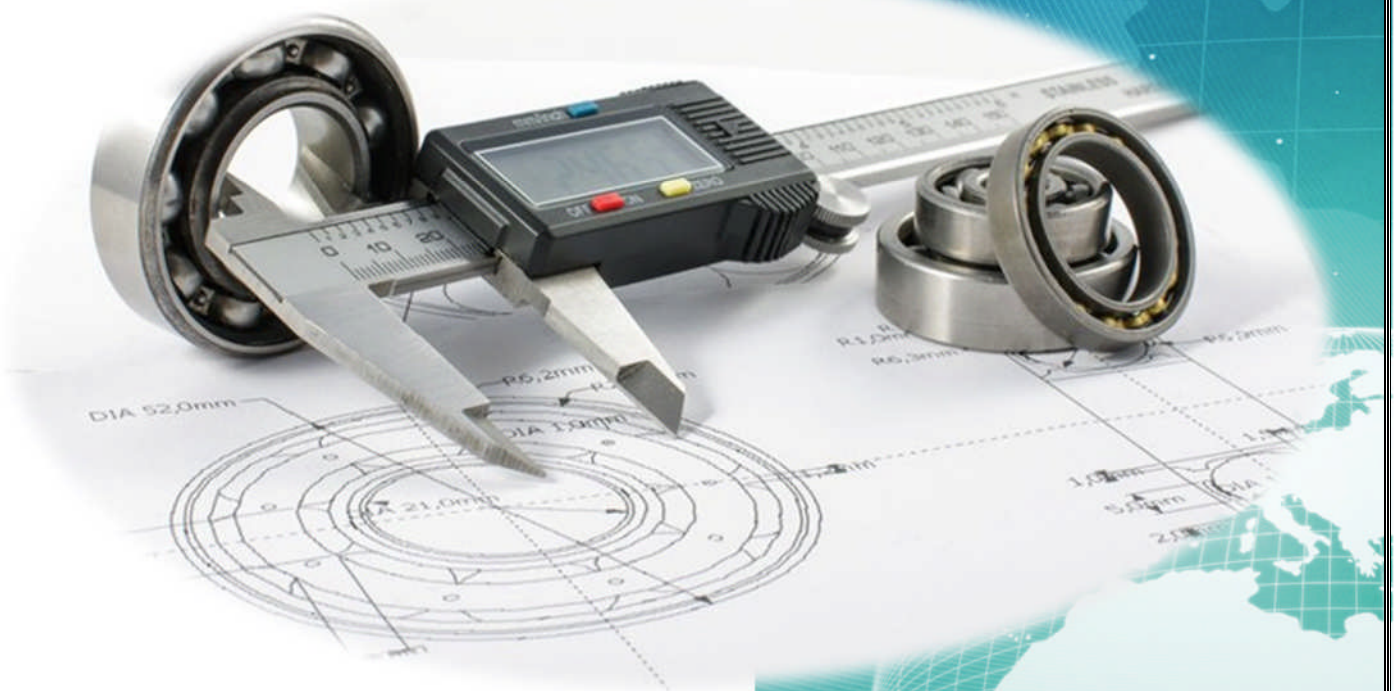


Fondements Technologiques sur la Métrologie Générale & Industrielle



Dr. MOKAS Nacer

*University Badji Mokhtar Annaba,
Faculty of Technology, Department of
Mechanical Engineering, Research
Laboratory of Advanced Technologies
in Mechanical Production LRTAPM*

Fondements Technologiques sur la Métrologie Générale & Industrielle

A L'usage :

- Des étudiants en Master 1 spécialité fabrication mécanique et productique S1
- Des étudiants en Master I spécialité Ingegneri de la maintenance S1 ;
- Des étudiants en 3eme année spécialité construction mécanique ;
- Des étudiants de 2ème année science technique S3 ;
- Des instituts universitaires de technologie ;
- Des écoles d'ingénieurs ;
- Des auditeurs de formation continue ;
- Des dessinateurs et préparateurs ;
- Des techniciens en activité dans des entreprises ;
- Des élèves de l'enseignement technique



Dr. MOKAS Nacer

Directeur du Laboratoire de Recherche des Technologies
Avancées en Production Mécanique **LRTAPM**
Université Badji Mokhtar Annaba B.P 12 23000
Faculté De Technologie. Département de Génie Mécanique

Préface

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité. Ce cours vise l'acquisition des *fondements* technologiques sur la *métrologie* générale et industrielle les notions acquises permettront de reconnaître l'ensemble des moyens techniques utilisés et les opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur, prendre connaissance des différents organismes et systèmes régissant la science de la mesure.

Compétences requises

Science de la mesure, la métrologie nécessite des connaissances et des compétences dans des domaines pour découvrir les grands concepts de la métrologie, d'appréhender les étapes incontournables d'un processus de mesure :

- Dessin industriel : représentation, cotation, tolérancement, GPS ... ;
 - CAO : apprentissage d'un logiciel professionnel ;
 - Procédés et méthode de fabrication de base : fraisage, tournage, ... ;
 - Utilisation des instruments de mesure et contrôle, la notion d'erreur, les méthodes de calcul d'incertitude, sans oublier les méthodes d'étalonnage.
-

Table des matières

Introduction	1
Ch. I. Métrologie Générale	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition.	2
I.3. Vocabulaire métrologique.....	2
I.3.1 Section 1 : Vocabulaire lié aux Grandeurs et unités.....	3
I.3.2. Section 2 : Vocabulaire lié aux Mesurages	3
I.3.3. Section 3 : Vocabulaire lié aux résultats de mesure	4
I.3.4. Section 4 : Vocabulaire lié aux instruments de mesure	4
I.3.5 Section 5 : Vocabulaire lié aux caractéristiques des Instruments de mesure	4
I.4. Erreurs et incertitudes en métrologie	5
I.4.1. Sources d'incertitudes de mesure.....	6
I.4.2. Classification des erreurs en mesure.....	7
I.4.2.1. Valeur brute	8
I.4.2.2. Erreur systématique.....	8
I.4.2.3. Erreur fortuite.....	9
I.4.2.4. Erreur aléatoire.	9
I.4.2.5. Erreur accidentelle.....	10
I.4.2.6. Erreur absolue et erreur relative.....	10
I.4.3. Incertitude technique.....	11
I.4.4. Incertitude de mesure totale	11
I.4.5. Résultat de mesurage complet	11
I.4.6. Intervalle de confiance.....	12
I.5. Risques et conséquences d'une erreur en métrologie.....	12
I.5.1. Le risque économique.....	12
I.5.2. Le risque juridique	12
I.6. Interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle.....	13
I.7. Etalonnages des instruments de mesure.....	13

I.7.1. Définition.....	14
I.7.2. Vérification.....	14
I.7.3. Classification des étalons	14
I.7.4. Garantie et traçabilité.....	15
I.8. Différentes axes de compétences de la métrologies.....	16
I.8.1. La métrologie fondamentale ou scientifique.....	17
I.8.2. La métrologie légale.....	17
I.8.3. La métrologie industrielle.....	18
I.9. Rôle de la fonction métrologie dans l'entreprise.....	18
I.10. Instituts et Organismes internationaux liés à la métrologie.....	18
I.10.1 Principaux organismes de normalisation.....	19
I.10.1.1 L'Organise de l'UIT.....	20
I.10.1.2 L'Organise de la IEC.....	20
I.10.1.3. L'Organise de l'ISO.....	21
I.11. Définition de la métrologie selon l'ISO.....	21
I.11.1. Rappels sur les normes de qualités I.S.O. 9000.....	22
I.12. Réseau Maghrébin de Métrologie (MAGMET)	22
I.13. Histoire de la metrologie en Algerie.....	23
Ch. II. Métrologie industrielle.....	25
II.1. introduction	25
II.2. Rôle de la métrologie industrielle.....	25
II.3. Organisation d'une chaîne d'étalonnage.....	26
II.3.1. Étalon primaire.....	27
II.3.2. Étalon de références.....	28
II.3.3. Etalon secondaire.....	28
II.3.4. Étalon de travail (de contrôle)	28
II.4. Système d'unités international	28
II.4.1. Unités de base.....	28
II.5. Technique Contrôle.....	30
II.6. Conditions de mesures.....	30

II.6.1. Instruments de mesure et contrôle mécaniques.....	31
II.6.2. Qualités métrologiques des instruments de mesures.....	31
II.6.3. Classification des instruments de mesure.....	31
II.7. Les instruments de mesure à dimensions variables.....	32
II.7.1 Contrôle par mesure direct.....	32
II.7.1.1. Le pied à coulisse description.....	32
II.7.1.2. Différents types de pied à coulisse.....	33
II.7.1.3. Echelle et résolution du vernier.....	35
II.7.1.4. Modèles de pieds à coulisse selon la resolution.....	36
II.7.1.4.1. Pied à coulisse au dixième (1/10)	36
II.7.1.4.2. Pied a coulisse au vingthiemme (1/20)	37
II.7.1.4.3. Pied a coulisse au cinquantiemme (1/50e)	38
II.7.1.4.4. Principe de la précision.....	39
II.7.1.5. La jauge de profondeur.....	40
II.7.1.6. Le trusquin.....	40
II.7.1.7. Le micromètre ou le palmer.....	41
II.7.1.8. Mesure d'angles.....	44
II.7.1.8.1. Unité de mesure des angles.....	45
II.7.1.8.2. Instrument de mesure d'angles.....	46
II.7.1.8.3. Instrument de mesure d'angles en topographie.....	49
II.7.2. Contrôle par mesure indirect ou par comparaison.....	50
II.7.2.1. Mesure par comparaison (Le comparateur)	51
II.7.2.1.1. Principe de fonctionnement.....	51
II.7.2.1.2. Principales utilisations.....	51
II.7.2.1.3. Conditions normales d'utilisation.....	52
II.7.2.1.4 Types de comparateurs.....	52
II.7.2.2. Mesure par calibrage (Instruments de mesure à dimensions fixes.....	53
II.7.2.2.1. Calibres à limites pour alésages (Tampon lisse)	54
II.7.2.2.2. Calibres à limites pour arbre (bague lisse et calibres mâchoires)	54
II.7.2.2.3. Calibres à limites pour filetage.....	55
II.7.2.2.4. Bague Pour contrôle d'angles.....	55
II.8. Contrôle de défauts géométrique.....	57
II.8.1. Tolérances de forme.....	57

II.8.2. Tolérances d'orientation.....	58
II.8.3. Tolérances de position.....	60
II.8.4. Tolérances de battement.....	61
II.9. Contrôle des défauts de surface.....	62
II.9.1. Indication de la rugosité.....	62
II.9.2. Instruments de mesure de la rugosité (profilomètres)	63
II.10. Machines à mesurer tridimensionnelles.....	64
II.10.1. Principe générale.....	64
II.10.2. Architecture des Machines à Mesurer Tridimensionnelles.....	64
II.10.3. Dispositif de palpage.....	65

Liste des figures

Fig.1 : Sources d'erreurs aléatoires.....	6
Fig.2 : Illustration de la notion de mesurage fidèle ou juste.....	7
Fig.3 : Erreurs du à l'étalonnage de l'appareil de mesure.....	8
Fig.4 : Erreurs d'observation de l'operateur.....	8
Fig.5 : Comparatif entre erreur de précision et biais.....	9
Fig.6 : Erreur de déclenchement d'un chronomètre.....	10
Fig.7 : Interféromètre de Précision de triple modo : Michelson.....	15
Fig.8 : Calles étalent de métrologie.....	15
Fig.9 : Schéma de la chaîne de traçabilité métrologique.....	16
Fig.10 : Le logo de l'union internationale des télécommunications UIT crée en 1947.....	20
Fig.11 : Logo de l'International Electrotechnical Commission).....	21
Fig.12 : Logo de l'organisation internationale de normalisation ISO.....	21
Fig.13 : Logo du reseau maghrebin de metrologie (MAGMET).....	23
Fig.14 : Logo de quelques organismes liées à la métrologie en algerie.....	24
Fig.15 : Schéma directeur d'une chaîne d'étalonnage industrielle.....	27
Fig.16 : L'étalon primaire du kilogramme en platine iridium cylindrique.....	27
Fig.17 : Classification des instruments de mesure.....	32
Fig.18 : Représentation d'un pied à coulisse.....	33
Fig.19 : Pied à coulisse à vernier.....	34
Fig.20 : Pied à coulisse à montre.....	34
Fig.21 : Pied à coulisse à lecture digitale.....	34
Fig.22 : Principe de division d'un vernier basic.....	35
Fig.23 (a et b) : Illustration de la lecture d'un vernier basic.....	36
Fig.24 : Vernier au dixième (1/10).....	36
Fig.25 : Méthode calcule de la résolution du vernier au dixième (1/10).....	37
Fig.26 : Exemple de lecture du PAC au 10eme.....	37
Fig.27 (a et b) : Pied à coulisse au vingtième (1/20).....	37
Fig.28 : Exemple de lecture d'un Pied à coulisse au vingtième (1/20).....	38
Fig.29 : Vernier au cinquantième (1/50).....	39
Fig.30 : (a et b) : Lecture d'un pied à coulisse au cinquantième.....	39

Fig.31 : Différents type de jauge de profondeurs.....	40
Fig.32 : illustration de différents modèles de trusquins.....	41
Fig.33 : Micromètres (ou Palmer) analogiques extérieur STEINMEYER.....	41
Fig.34 : Principaux organes du palmer.....	42
Fig.35 : Etalonnage d'un micromètre.....	42
Fig.36 : Démonstration d'une lecture du micromètre.....	43
Fig.37 : Exemple de lecture d'une mesure par un micromètre.....	43
Fig.38 : Micromètre à cadran et digitale pour mesure extérieur.....	44
Fig.39 : Micromètre d'intérieur à becs et trois touches.....	44
Fig.40 : Rapporteur d'angle à vernier.....	47
Fig.41 (a,b,c,d) : 4 Exemples de lecture d'angles.....	48
Fig.42 : Rapporteur d'angle à cadran.....	49
Fig.43 : Rapporteur d'angle numérique.....	49
Fig.44 : Télescope alidade ancien et nouveau.....	49
Fig.45 : Goniomètre a prisme ancien et nouveau.....	49
Fig.46 : Le théodolite ancien et nouveau de haute précision.....	50
Fig.47 : Le sextant ancien et nouveau.....	50
Fig.48 : Chaîne cinématique du comparateur à cadran.....	51
Fig.49 : Principe de comparaison d'une cote avec étalon.....	52
Fig.50 : Principe de mesure d'un écart de rectitude avec un comparateur.....	52
Fig.51 : Démonstration de modèles de comparateurs.....	53
Fig.52 : Calibres à limites pour alésages.....	54
Fig.53 : Bague lisse pour contrôle des arbres.....	54
Fig.54 : Calibre à mâchoire.....	55
Fig.55 : Tompon fileté.....	55
Fig.56 : Bague fileté.....	55
Fig.57 : Bague pour contrôle des portées coniques.....	55
Fig.58 : Calibre pour cône.....	56
Fig.59 : Différents types d'équerres d'atelier	56
Fig.60 : Barre sinus.....	56
Fig.61 : Plateau magnétique en table sinus.....	56
Fig.62 : Exemple d'application de la barre de sinus.....	57
Fig.63 : Représentation de l'ondulation et de la rugosité d'une surface.....	62
Fig.64 : Symbolisation des critères de la rugosité.....	63

Fig.65 : Caractéristiques d'un état de surface.....	63
Fig.66 : Profilomètres - Mesure de profils.....	63
Fig.67 : Machines de mesure tridimensionnelles MMT.....	64
Fig.68 : Machine de mesure structure portique.....	65
Fig.69 : Machine de mesure structure potence.....	65
Fig.70 : Machine de mesure structure cantilever.....	65
Fig.71 : Les têtes de palpées statique.....	66
Fig.72 : Les têtes de palpées dynamique.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Erreurs sur la mesure la tension électrique d'un moteur.....	9
Tableau 2 : Illustration des principales unités de base.....	29
Tableau 3 : Types de pieds à coulisse et précision.....	36
Tableau 4 : Conversion et correspondance entre les principales unités d'angle.....	46
Tableau.5 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances de forme.....	58
Tableau.6 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances d'orientation.....	59
Tableau.7 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances de position.....	60
Tableau.8 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances de battement.....	61

Liste des symboles

IUIT : Union internationale des télécommunications

PTB : physikalisch-technische Bundesanstalt / **Allemagne**

LNE : Laboratoire National d'Essais et de Métrologie / **France**

NPL : National Physical Laboratory / **Grande Bretagne**

NMi : Nederla,des Meetinstiut **Pays-Bas**

METAS : Métrologie et Accréditation Suisse

OIML : Organisation Internationale de Métrologie Légale

BIPM : Bureau International de Poids et De Mesure

INAPI : Institut National De La Propriété Industrielle (qui gère les normes en Algérie)

OANM:Organisation Arabe des Normes et Mesures (participent la totalité des pays arabes)

AFNOR : association française de normalisation

CEN : Comité Européen de Normalisation

DIN : Deutsche institut fur normung

NBN : Bureau de Nationalisation (organisation belge responsable de la réalisation et publication des normes en Belgique)

ISO : International System Organisation

BELAC/BELTEST : Organisation Belge D'accélération

COFRAC : le Portail Français de L'accélération

DKD : Deutsher Kalibrierdisest

EA : Européen Coopération For Accélération

ILAC : International Laboratory Accreditation Cooperation

MAGMET : Reseau maghrebin de metrologie

OIML : Organisation Internationale de la métrologie Légale

COFRAC : Certificats de référencés ou : « Comité français d'accréditation autres... »

SI : Système International d'unités

Introduction

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

Ce module permet à l'étudiant de savoir identifier et affermir la place de la fonction "Métrologie" au sein d'un laboratoire de contrôle, en relation avec le système d'assurance qualité en vigueur ou en projet dans une structure, d'apprendre à avoir confiance et inspirer confiance dans des résultats de mesure ou d'essais, de maîtriser les outils associés, d'acquérir les fondements de base sur le contrôle. L'étudiant doit avoir des connaissances de l'ensemble des techniques et des opérations nécessaires, ainsi que des notions de base en fabrication technologique, où 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.

Ch.I. Métrologie Générale

1.1. Introduction

La métrologie est la science de la mesure. Elle définit l'ensemble des opérations permettant de déterminer la ou les valeurs des grandeurs à mesurer qui peuvent être fondamentales (par exemple : une longueur, une masse, un temps, un courant, une quantité de matière, une température, intensité lumineuse) ou dérivées des grandeurs fondamentales (comme par exemple : une surface, un volume, une vitesse, une pression, puissance, la fréquence, l'énergie,...).

La métrologie recouvre trois principales activités :

- ✓ La définition des unités de mesure, acceptées internationalement, par exemple le mètre.
- ✓ La réalisation des unités de mesures au moyen d'expériences scientifiques, par exemple la réalisation du mètre au moyen de sources lasers.
- ✓ L'établissement d'une chaîne de traçabilité des mesurages ; La traçabilité est la propriété du résultat d'un mesurage tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées.

1.2. Définition

La métrologie est un art autant qu'une science, elle repose sur des principes et des méthodes scientifiques rigoureuses. En particulier elle puise ses bases dans tous les domaines de la physique. Elle appuie également sa démarche sur des éléments des mathématiques, comme le calcul numérique, les statistiques ou le calcul différentiel.

La **métrologie** est la science de la **mesure** au sens le plus large. La mesure est l'opération qui consiste à donner une valeur à une observation. Le terme désigne également l'ensemble des technologies de mesure utilisées dans l'industrie ainsi que les moyens technique utilisés pour le contrôle dimensionnel d'une pièce.

Dans l'industrie, la métrologie industrielle est un processus mis en place par les entreprises afin d'attester avec certitude de la conformité et de la validité des pièces produites en vérifiant leurs caractéristiques (dimensions, état de surface, rugosité), etc...

1.3. Vocabulaire métrologique

Le Vocabulaire International de Métrologie (**VIM**), donne un ensemble de définitions et de termes associés, en anglais et en français pour un système de concepts fondamentaux et généraux utilisés

en métrologie ainsi que des schémas conceptuels illustrant leurs relations.

Ce vocabulaire selon le Bureau International des Poids et Mesures (**BIPM**) comprend cinq grandes sections :

- ✓ Section 1 : Vocabulaire lié aux Grandeurs et unités :
- ✓ Section 2 : Vocabulaire lié aux Mesurages
- ✓ Section 3 : Vocabulaire lié aux résultats de mesure.
- ✓ Section 4 : Vocabulaire lié aux instruments de mesure
- ✓ Section 5 : Vocabulaire lié aux caractéristiques des Instruments de mesure.

1.3.1 Section 1 : Vocabulaire lié aux Grandeurs et unités

Dans cette section on peut trouver les définitions suivantes :

- ✓ **Grandeur** (mesurable) : Attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué et déterminé quantitativement.
- ✓ **L'unité de mesure** : c'est une grandeur particulière, définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement par rapport à cette grandeur.
- ✓ **Symbole d'une unité de mesure** : sigle conventionnel désignant une unité de mesure.
- ✓ **Système d'unités de mesure** : ensemble des unités de base et des unités dérivées, définies suivant des règles données, pour un système de grandeurs donné.
- ✓ **Système international d'unités SI** : système cohérent d'unités adopté et recommandé par la conférence générale des poids et mesures (CGPM).
- ✓ **Valeur d'une grandeur** : expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre.

1.3.2. Section 2 : Vocabulaire lié aux Mesurages

- ✓ **Mesurage** : Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- ✓ **Mesurande** : Grandeur particulière soumise au mesurage.
- ✓ **Grandeur d'influence** : Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui influe sur le mesurage.
- ✓ **Signal de mesure** : Grandeur qui représente le mesurande et qui lui est fortement liée.
- ✓ **Méthode de mesure** : succession logique des opérations, décrites d'une manière générique, mises en œuvre lors de l'exécution des mesurages.
- ✓ **La mesure (x)** : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

Remarque : On ne peut pas mesurer des grammes avec des mètres, ce n'est pas homogène.

1.3.3. Section 3 : Vocabulaire lié aux résultats de mesure

- ✓ **Résultat d'un mesurage :** valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage.
- ✓ **Résultat brut :** résultat d'un mesurage avant correction de l'erreur systématique.
- ✓ **Résultat corrigé :** résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique.
- ✓ **Exactitude de mesure :** Elle se définit à partir de la différence entre la valeur donnée par l'appareil de mesure et la valeur réelle de la grandeur mesurée.
- ✓ **Répétabilité des résultats de mesurage :** étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure (même procédé de mesure, même observateur, même Instrument de mesure, même emplacement....).
- ✓ **Reproductibilité des résultats de mesurage :** étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.
- ✓ **Incertitude (dx) :** Le résultat de la mesure (x) d'une grandeur (X) n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x. Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

Ainsi, on a : $x - dx < X < x + dx$.

1.3.4. Section 4 : Vocabulaire lié aux instruments de mesure

- ✓ **Calibrage :** positionnement matériel de chaque repère d'un instrument de mesure en fonction de la valeur correspondante du mesurande.
- ✓ **Ajustage :** opération destinée à amener un instrument de mesure à un état de fonctionnement convenant à son utilisation
- ✓ **Réglage :** ajustage utilisant uniquement les moyens mis à la disposition de l'utilisateur.
- ✓ **Un étalon :** défini comme mesure matérialisée, appareil de mesure, matériau de référence destiné à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs d'une grandeur pour servir de référence.

1.3.5 Section 5 : Vocabulaire lié aux caractéristiques des Instruments de mesure

- ✓ **Etendue de mesure :** ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée comprise entre des limites spécifiées.
- ✓ **Conditions assignées de fonctionnement :** conditions d'utilisation pour lesquelles les caractéristiques métrologiques spécifiées d'un instrument de mesure sont supposées comprises entre des limites données.

- ✓ **Conditions limites** : conditions extrêmes qu'un instrument de mesure doit pouvoir supporter sans dommage et sans dégradation des caractéristiques métrologiques spécifiées lorsqu'il est ensuite utilisé dans ses conditions assignées de fonctionnement.
- ✓ **Conditions de référence** : conditions d'utilisation prescrites pour les essais de fonctionnement d'un instrument de mesure ou pour l'inter comparaison de résultats de mesures.
- ✓ **Sensibilité** : quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée.
- ✓ **Seuil de mobilité** : variation la plus grande du signal d'entrée qui ne provoque pas de variation détectable de la réponse d'un instrument de mesure, la variation du signal d'entrée étant lente et monotone.
- ✓ **Erreur de justesse d'un instrument de mesure** : erreur systématique d'indication d'un instrument de mesure.
- ✓ **Justesse d'un instrument de mesure** : aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.
- ✓ **Fidélité d'un instrument de mesure** : aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

1.4. Erreurs et incertitudes en métrologie

Le résultat d'une mesure ne peut pas être parfait. Il ne correspond pas à la «**Valeur vraie**». L'incertitude provient d'une déviation aléatoire de la valeur d'une mesure qui est différente à chaque fois qu'une même mesure est effectuée. A chaque étape du processus de mesure, des écarts par rapport à la « valeur vraie » apparaissent. L'incertitude est un indicateur de la qualité d'un résultat de mesure, l'objectif de toute mesure est d'essayer d'obtenir des résultats "**justes**". L'incertitude doit donc inclure une composante liée à la justesse.

En toute rigueur, le métrologue doit corriger tous les effets systématiques en appliquant des corrections, il reste alors à prendre en compte dans l'évaluation de l'incertitude du résultat l'incertitude sur les corrections. Quand le métrologue décide de ne pas appliquer de correction, l'incertitude sur le résultat est bien plus grande. Le terme incertitude de mesure exprime cet écart et il est nécessaire de le quantifier pour une bonne interprétation d'un résultat. Les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention. La valeur de toute autre mesure ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. L'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte est l'erreur de mesure et elle ne peut être donc qu'estimée. Cependant une conception rigoureuse de la chaîne de mesure

et du choix des instruments de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

1.4.1. Sources d'incertitudes de mesure

L'incertitude est directement liée au fait qu'un mesurage n'est jamais parfait et que ces imperfections vont générer une erreur sur la valeur numérique obtenue. Cette erreur peut provenir de différentes causes que l'on classe en deux familles : des **erreurs systématiques** (effets identiques si la mesure est répétée de manière identique) et des **erreurs aléatoires** (effets non-répétables).

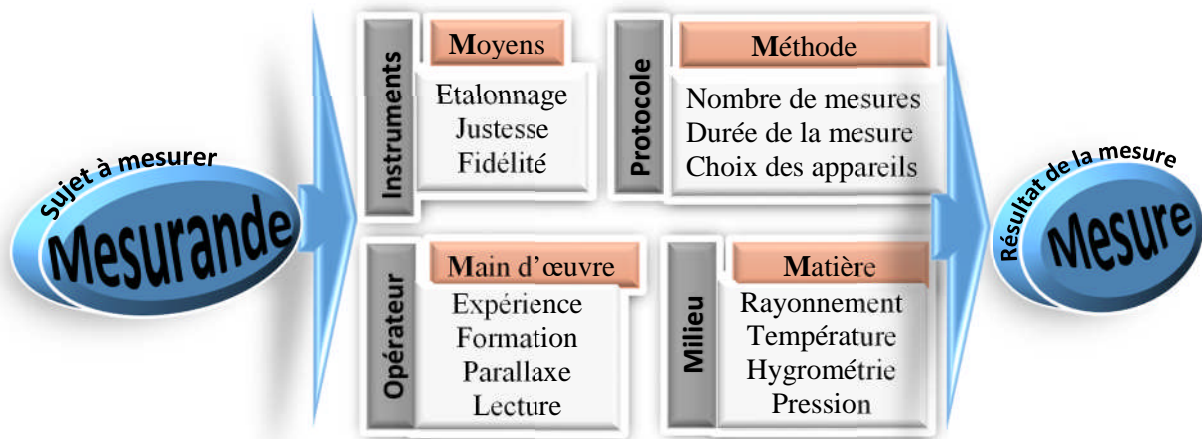


Fig.1 : Sources d'erreurs aléatoires.

Il existe dans la pratique de nombreuses causes possibles à l'origine de l'erreur de mesure :

- ✓ Définition incomplète du mesurande ;
- ✓ Réalisation imparfaite de la définition du mesurande ;
- ✓ Echantillonnage non-représentatif (l'échantillon peut ne pas représenter le mesurande défini) ;
- ✓ Connaissance insuffisante des effets des conditions d'environnement sur le mesurage ou mesurage imparfait des conditions d'environnement ;
- ✓ Biais dû à l'observateur pour la lecture des instruments analogiques ; résolution finie de l'instrument ou seuil de mobilité ;
- ✓ Valeurs inexactes des étalons et matériaux de référence ;
- ✓ Valeurs inexactes des constantes et autres paramètres obtenus de sources extérieures et utilisés dans l'algorithme de traitement des données ; approximations et hypothèses introduites dans la méthode et dans la procédure de mesure ;
- ✓ Variations entre les observations répétées du mesurande dans des conditions apparemment identiques.

Il faut considérer trois principales sources d'erreur (*uncertainty* en anglais) :

- ✓ La précision de la mesure Δ_1 , ou l'incertitude (*resolution* en anglais) ;
- ✓ La dispersion statistique Δ_2 (*precision* en anglais) ;
- ✓ L'erreur systématique Δ_3 (*accuracy* en anglais).

L'erreur totale étant $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$

Si on fait la comparaison avec des flèches qu'on tire sur une cible (figure I.2) :

- 1- Pour la 1ère cible : mesurage ni fidèle ni juste (ni exacte ni précis).
- 2- Pour la 2ème cible : mesurage fidèle mais pas juste (pas exact mais précis).
- 3- Pour la 3ème cible : mesurage peu fidèle peu juste (peu exact peu précis).
- 4- Pour la 4ème cible : mesurage fidèle et juste (exacte et précis).

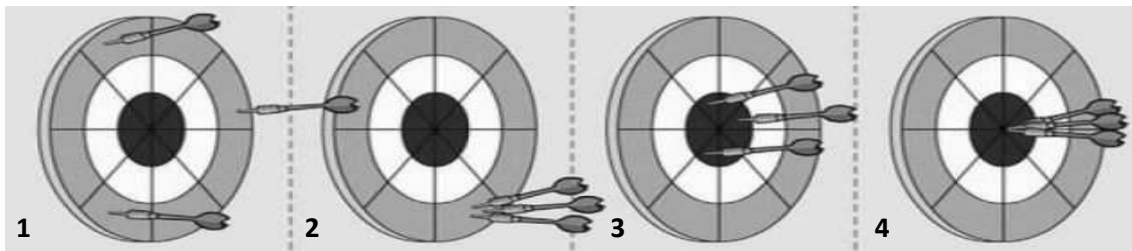


Fig.2 : Illustration de la notion de mesurage fidèle ou juste.

La précision de mesure (résolution) sert à désigner la taille de la pointe de la flèche ;

La dispersion statistique (précision) sert à désigner le fait que les flèches sont proches les unes des autres, ou bien au contraire éparpillées sur la cible ;

L'erreur systématique (*accuracy*) indique si les flèches visaient bien le centre, ou bien un autre point de la cible.

Métaphore de l'incertitude de mesure :

- ✓ (Fig. a) la dispersion statistique et l'erreur systématique sont faibles ;
- ✓ (Fig. a) la dispersion statistique est forte mais l'erreur systématique est faible ;
- ✓ (Fig. a) la dispersion statistique est faible mais l'erreur systématique est forte.

I.4.2. Classification des erreurs en mesure

De façon générale, l'erreur de mesure correspond à l'écart existant entre la valeur réelle que l'on veut mesurer et la valeur mesurée. Les erreurs se classent en fonction de leur cause qui doit être soigneusement identifiées afin de les prévenir. On distingue différentes sortes d'erreurs dont toute mesure peut être affectée :

I.4.2.1. Valeur brute

La valeur brute est la valeur déterminée par l'instrument de mesure. Une erreur brute justifierait le résultat obtenu pour la valeur calculée et le signe algébrique d'une éventuelle erreur brute.

1.4.2.2. Erreur systématique

Une erreur systématique est un problème dans le processus de mesure qui se produit pour chaque mesure effectuée. Cette erreur est une "déviation" constante, négative ou positive introduit par l'instrument, c'est un problème dans le processus de mesure qui se produit pour chaque mesure effectuée.

Ce type d'erreurs se produit par exemple lorsqu'on emploie des unités mal étalonnées (échelle fautive, chronomètre mal ajusté) ou lorsqu'on néglige certains facteurs qui ont une influence sur la marche de l'expérience (par exemple : l'influence du champ magnétique terrestre dans une mesure magnétique). Cela mène à un décalage (biais) du résultat si l'erreur commise est toujours la même. Les erreurs systématiques influencent l'exactitude (ou justesse) de la mesure.

Dans la plupart des cas, les erreurs systématiques, pour autant qu'on connaisse leur causes, peuvent être prises en considération par une correction correspondante apportée au résultat de la mesure. De façon plus générale on parle d'erreur systématique quand, par rapport à une valeur de référence x , l'instrument donnera toujours comme valeur observée $x+b$ (déviation positive ou négative).

Par exemple, pour un instrument comme votre balance, si elle affiche systématiquement "+ 2 kilogrammes" par rapport au poids réel, l'erreur systématique est de +2 kg. Ce sont des erreurs **reproductibles** reliées à leur cause : défaut de l'appareil de mesure mal étalonné ou mauvaise lecture de l'opérateur (figure 3 et 4).



Fig.3 : Erreurs du à l'étalonnage.

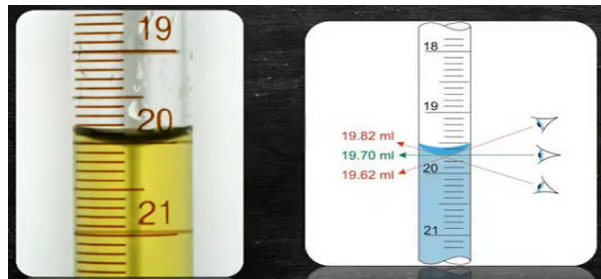


Fig.4 : Erreurs d'observation de l'opérateur.

A chaque mesure on va retrouver les mêmes erreurs puisque 'il y aura toujours un décalage. Parmi ces erreurs, on cite :

- ✓ Erreur de **zéro** (offset) ;
- ✓ L'erreur **d'échelle** (gain) : c'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée ;
- ✓ L'erreur de **linéarité** : la caractéristique n'est pas une droite ;
- ✓ L'erreur due au phénomène **d'hystérésis** : lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente ;

- ✓ Le **biais** : Les biais sont des erreurs méthodologiques ayant comme conséquence systématique de produire des estimations supérieures ou inférieures à la valeur réelle des paramètres étudiés (ici les risques relatifs). Les biais sont indépendants de la taille de l'échantillon. Ces erreurs systématiques (biais) sont à distinguer des erreurs dites aléatoires, uniquement dues au hasard. Quand on augmente la taille de la population d'étude, cela permet de diminuer les erreurs aléatoires (liées aux fluctuations d'échantillonnages) mais cela ne diminue pas les biais (figure 5).

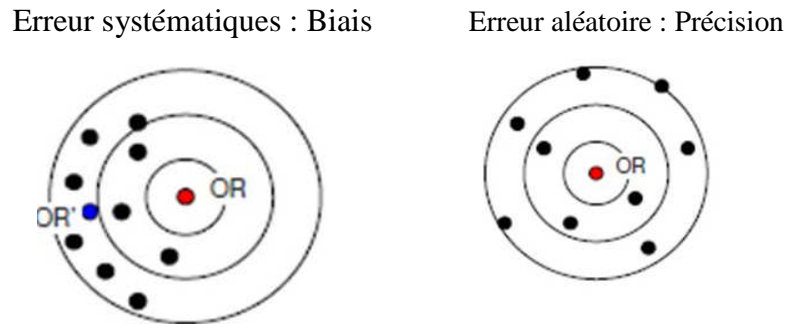


Fig.5 : Comparatif entre erreur de précision et biais

Exemple : Défaut biais et linéarité

Tableau 1 : Erreurs sur la mesure la tension électrique d'un moteur

<i>Valeurs rebelles</i>	<i>120</i>	<i>240</i>	<i>Défaut Biais ?</i>	<i>Défaut Linéaire ?</i>
<i>Mesure 1</i>	<i>125</i>	<i>245</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
<i>Mesure 2</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>Oui</i>	<i>Oui</i>
<i>Mesure 3</i>	<i>120</i>	<i>252</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>

La solution il faut corriger l'instrument de mesure.

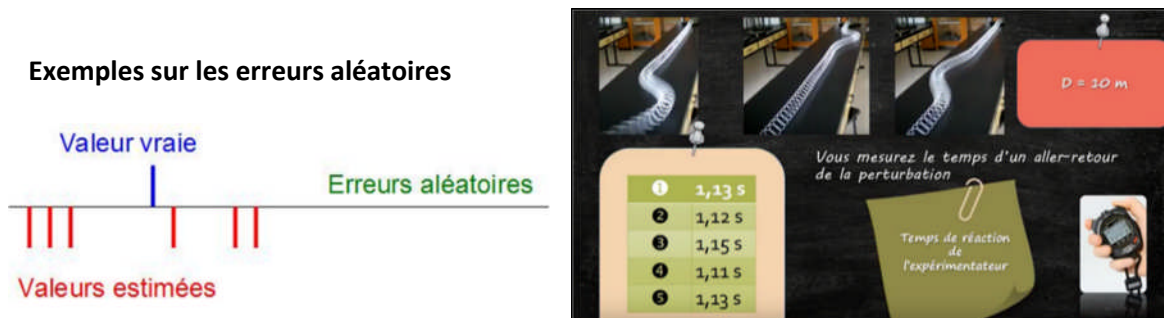
1.4.2.3. Erreur fortuite

L'exploitation des mesures entachées d'erreurs fortuites est le problème posé par des séries importantes d'observations portant sur une grandeur x , compte tenu du fait que les erreurs systématiques supposées connues ont été éliminées. Il ne reste donc que des erreurs qu'on peut qualifier d'accidentelles, ou aléatoires, présentant une dispersion régie par les lois du hasard, et sur lesquelles on ne fait pour le moment aucune hypothèse.

1.4.2.4. Erreur aléatoire

Ce sont des erreurs imprévisibles et **non reproductibles**, qui obéissent à des lois statistiques. Cette erreur est le résultat d'un ensemble de facteurs (inconnus) associée à la notion de fidélité et celle à laquelle on fait le plus souvent référence. Dans la construction des tests et l'analyse de la fidélité, quand on parle d'erreur de mesure, on fait référence à ce qu'on appelle l'erreur aléatoire.

L'erreur aléatoire sur une mesure sera légèrement supérieure à la valeur réelle et parfois légèrement inférieure. Un instrument de mesure est toujours construit pour minimiser cette erreur aléatoire (la mesure observée doit être toujours proche de la mesure de référence ou plus exactement la dispersion autour de cette valeur de référence, lors d'observations multiples, est faible). A chaque mesure on ne va pas retrouver les mêmes erreurs. La solution il faut reprendre plusieurs fois la mesure et faire une moyenne



. Fig.6 : Erreur de déclenchement d'un chronomètre.

1.4.2.5. Erreur accidentelle

Elle résulte d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil de mesure. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

1.4.2.6. Erreur absolue et erreur relative

L'erreur absolue mesure l'imprécision sur une mesure que nous effectuons et s'exprime :

$$\delta\alpha = \text{valeur approchée} - \text{valeur réelle}$$

Elle est appelée absolue, car elle est le résultat de la valeur absolue de la différence entre d'une part la **valeur réelle** de la grandeur que l'on mesure et d'autre part une **valeur de référence** que nous avons choisie comme une bonne approximation de celle-ci. Elle est donc toujours un nombre positif. Si on note x la valeur réelle, α la valeur de référence, et $\delta\alpha$ l'erreur absolue, on peut écrire :

$$\delta\alpha = |\alpha - x| = |x - \alpha|$$

Par exemple, si nous souhaitons mesurer une longueur en centimètres et que cette longueur est supérieure ou inférieure de moins de 0,5cm à une valeur de référence α en centimètres, on a :

$\delta\alpha < 0,5$ Ce qui se traduit par un intervalle de valeurs pour x (valeurs réelles de la longueur) :

$$|\alpha - x| < 0,5 \quad \text{Soit : } \alpha - 0,5 < x < \alpha + 0,5$$

Ou encore : x est dans l'intervalle : $[\alpha - 0,5 ; \alpha + 0,5]$

$$\text{L'erreur relative est : } \delta\alpha_r = \frac{\text{valeur approchée} - \text{valeur réelle}}{\text{valeur réelle}} \quad \delta\alpha_r = \frac{\delta\alpha}{\text{valeur réelle}}$$

Remarque : l'erreur relative est souvent exprimée en %

Le résultat donne un rapport, par exemple 0,14. Cela signifierait que l'erreur relative est de +0,14, soit 14 %. Remarquons que dans cette définition, il n'y a pas de valeur absolue au numérateur, de sorte qu'il s'agit d'une erreur relative algébrique : si elle est positive, c'est que la valeur approchée est supérieure à la valeur exacte (on parle d'erreur par excès), et si elle est négative, c'est qu'elle est inférieure (erreur par défaut). Donc la valeur approchée est obtenue par :

$$(\text{Valeur réelle}) \times (1 + \delta\alpha_r)$$

1.4.3. Incertitude technique

L'incertitude technique est rencontrée dans la conception et la fabrication de produits ou même dans leurs usages par les entreprises, les organisations publiques civiles et militaires ou les consommateurs. Il s'agit d'une expérience commune, qui ne se limite pas au temps présent, loin de là. Elle peut entraîner des catastrophes et déboucher sur des remises en cause organisationnelles, industrielles ou scientifiques. Les recherches récentes réalisées par des historiens aux États-Unis apportent des éclairages très neufs sur l'opacité délibérée de certains dispositifs techniques et ses dimensions politiques, sur la distinction entre incertitude technique cognitive, matérielle et prospective et sur les pratiques adoptées face à elle : de la sociabilité locale au partage des ressources intellectuelles à l'échelle nationale, à la coopération avec les universités et à l'élaboration d'outils probabilistes.

1.4.4. Incertitude de mesure totale

Une incertitude de mesure « caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées ». Considérée comme une dispersion, elle fait appel à des notions de statistique. Les causes de cette dispersion, liées à différents facteurs, influent sur le résultat de mesurage, donc sur l'incertitude ; elle comprend de nombreuses composantes qui sont évaluées de deux façons différentes ; Certaines peuvent être évaluées par une évaluation dite de type A, par une analyse statistique, les autres composantes, peuvent être évaluées par une évaluation dite de type B par d'autres moyens.

1.4.5. Résultat de mesurage complet

Le mesurage complet est un ensemble de valeurs attribuées à un mesurande complété par toute information pertinente disponible. Une expression complète du résultat du mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure qui permet d'indiquer quel est l'intervalle des valeurs probables du mesurande. En métrologie, on appelle souvent (**m**) la mesure de la valeur de la grandeur (un nombre), et (**M**) le résultat de la mesure, c'est à dire l'expression complète du résultat (un intervalle de valeurs).

1.4.6. Intervalle de confiance

Il devient donc indispensable d'évaluer l'incertitude de mesure pour assurer la fonctionnalité du produit, en donnant un intervalle de confiance (généralement de 95 à 99,7%) à l'intérieur duquel la probabilité de trouver la valeur vraie est importante.

5. Risques et conséquences d'une erreur en métrologie

Dès qu'il y a prise de décision, il y a risque. En métrologie, les risques associés à une erreur sur une prise de décision peuvent être de différentes natures : économique, juridique (civil ou pénal), image de l'entreprise.

1.5.1. Le risque économique

C'est celui que nous voyons en premier car il est très facile de relier une erreur de mesure à des coûts de rebut ou de reprise de pièce, à des pénalités de retard... Sur ce sujet, il faut cependant rester prudent car, très souvent, il y a des coûts cachés ou indirects que nous oublions de prendre en compte. Par exemple, un client peut perdre confiance et faire appel à de nouveaux fournisseurs, de manière partielle ou totale, en vous éliminant de son panel. Bien évidemment, dans cette catégorie de risques entrent également tous les aspects liés à la perte d'image.

1.5.2. Le risque juridique

Il est probablement plus rare mais il ne faut pas le sous-estimer. Imaginez les conséquences possibles si, par exemple, vous déclarez conforme une pièce de sécurité destinée à être installée sur une automobile ou un avion alors qu'elle ne l'est pas. Un autre exemple, qui conduit parfois à des amendes, concerne la surveillance des paramètres physico-chimiques de nos rejets industriels. En effet, la réglementation fixe des seuils de pollution à ne pas dépasser mais il arrive que, sur la base de l'exploitation des résultats des paramètres surveillés, nous estimions être à l'intérieur des limites alors qu'il n'en est rien. Ainsi, selon les conséquences qui découlent de telles erreurs de décision, le coût associé peut vite devenir non négligeable, voir mettre en péril la santé financière de l'entreprise. Bien évidemment, il ne s'agit pas de prendre des marges de sécurité inutiles et compliquées dont le coût peut parfois se révéler important pour tendre vers le risque zéro qui, d'ailleurs, n'existe pas. L'idée est de maîtriser les mesures réalisées dans l'entreprise à un niveau de risque acceptable et adapté, en ne faisant ni de la sur-qualité, ni de la sous-qualité. C'est à ce niveau qu'intervient la capacité d'un processus de mesure, c'est-à-dire sa capacité à fournir un résultat nous permettant de prendre une décision. Cette capacité est fonction, d'une part, de l'incertitude de mesure, d'autre part, de la tolérance sur la grandeur à mesurer.

En milieu industriel, la finalité ultime d'un processus de mesure est de fournir le moyen de piloter le processus de fabrication afin de garantir la conformité du produit fabriqué. Dans ce cas, la

maîtrise du pilotage est la preuve de la capabilité du processus de mesure. En résumé, il convient de maîtriser les mesures au juste nécessaire en fonction du niveau de risque que l'entreprise peut accepter. C'est à la fonction métrologie qu'il appartient d'assurer cette maîtrise du risque.

1.6. Identification et interprétation du GPS en vue du contrôle

Utilisateur sera chargé de prendre des décisions :

- ✓ Acceptation ou refus d'un produit suite à l'établissement d'une conformité ou non-conformité à une spécification ;
- ✓ Validation d'une hypothèse dans le cadre d'un développement ;
- ✓ Réglage d'un paramètre dans le cadre du contrôle d'un procédé de fabrication ;
- ✓ Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système ;
- ✓ Diagnostic médical ;
- ✓ Protection de l'environnement...etc.

La qualité du résultat de mesure conditionne essentiellement la fiabilité et la pertinence des décisions prises qui concourent à la qualité du produit ou du service. Satisfaire un client, au sens de la métrologie, c'est lui fournir le produit qu'il attend, au juste prix, avec une fiabilité maximale. L'esprit de cette réglementation permet d'atteindre les objectifs suivants :

a- En termes de protection des consommateurs

L'information du consommateur de la quantité proposée par la réglementation de la déclaration du contenu (étiquetage).

b. En termes d'avantages pour les professionnels

Les réglementations du contenu net et les contrôles réguliers par des vérificateurs neutres (Agents de l'État) garantissent les mêmes conditions de concurrence à l'industrie et au commerce.

Rappel : Mesurer, c'est attribuer à une grandeur une valeur numérique en la comparant directement ou indirectement à un étalon.

1.7. Etalonnages des instruments de mesure

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 une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication. Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec

une incertitude de mesure associée. Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement «auto-étalonnage», ni avec la vérification de l'étalonnage.

L'étalon de référence est aussi parfois appelé «calibrateur». Logiquement, l'instrument de référence est plus précis que l'instrument à étalonner. L'instrument de référence doit lui-même être étalonné de manière traçable. En fonction de la grandeur mesurée, l'étalon de référence n'est pas nécessairement un instrument, mais peut aussi être, par exemple, une masse, une pièce mécanique, un étalon physique, liquide ou gazeux...

1.7.1. Définition

C'est l'ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée. Les valeurs obtenues dans un mesurage sont le résultat de mesures effectuées dans un processus de mesure comportant un instrument de mesure. Cet appareil, susceptible de variabilité dans le temps doit être étalonné avec un ou plusieurs étalons.

1.7.2. Vérification métrologique

La vérification métrologique consiste à apporter la preuve par des mesures (étalonnage) que des exigences spécifiées sont satisfaites. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de conformité (suivi d'une remise en service) ou de non-conformité (suivi d'un ajustage, d'une réparation, d'un déclassement ou d'une réforme de l'appareil).

1.7.3. Classification des étalons

Mesure matérialisée, appareil de mesure ou système de mesure, destinés à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs connues d'une grandeur pour les transmettre par comparaison à d'autres instruments de mesure ainsi servir de référence. Le principe de classification des boîtes de cale étalons en 4 Classes, suivants l'incertitude sur la longueur de cale étalon mesuré :

- ✓ **Classe 0** : Etalon pour le contrôle des cales de travail, pour la mise au point d'instruments de mesure avec une précision élevée. Etalon de référence pour labo.
- ✓ **Classe K** : Pour laboratoire livré avec un certificat RVA ;
- ✓ **Classe 1** : Pour le contrôle des cales et calibres d'essai et pour la mise au point des instruments de mesure linéaires pour un travail de précision ;
- ✓ **Classe 2** : Pour la mise au point ou le contrôle des instruments pour l'ajustement des outillages, des dispositifs ou des machines.

Exemple : Le mètre est défini comme la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant un intervalle de temps de $1/299\,792\,458$ de seconde.

Le mètre est réalisé au niveau primaire en termes de longueur d'onde d'un laser hélium- néon stabilisé sur l'iode. A des niveaux inférieurs, les mesures matérielles comme les cales étalons sont utilisées, et la traçabilité est assurée en utilisant l'interférométrie optique pour déterminer la longueur des cales étalons en référence à la longueur d'onde laser

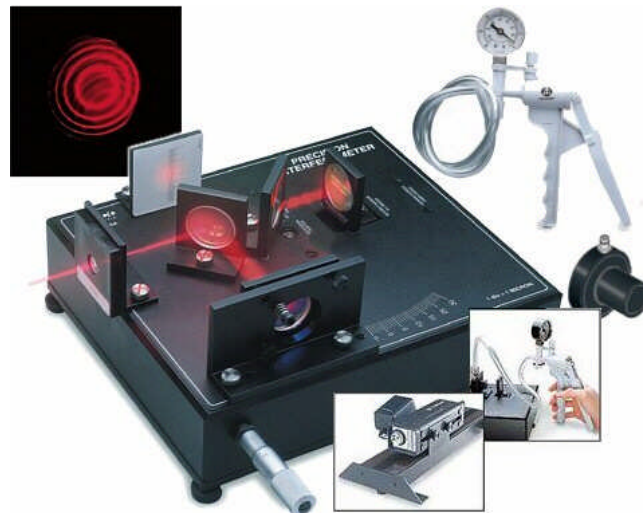


Fig.7 : Interféromètre de Précision de triple modo : Michelson, Fabry-Perot y Twyman-Green, completo con láser Pasco - OS-9258B



Fig.8 : Calles étalons de métrologie.

1.7.4. Garantie et traçabilité

La traçabilité joue un rôle essentiel dans la surveillance et l'appréciation de la qualité d'un produit, et est importante pour la sécurité et la protection des consommateurs. Cette traçabilité doit donc être garantie. Pour cela, une chaîne de traçabilité est définie. Les différents niveaux des étalons de mesures sont montrés en figure (9), ainsi que les domaines d'activité, les sous- domaines et les étalons de mesures importants. La chaîne de traçabilité schématise la dissémination des étalons de

mesure : c'est une chaîne ininterrompue de références et d'instrumentations qui garantissent le raccordement jusqu'à l'unité avec une incertitude donnée. Elle est usuellement représentée sous la forme d'une pyramide.

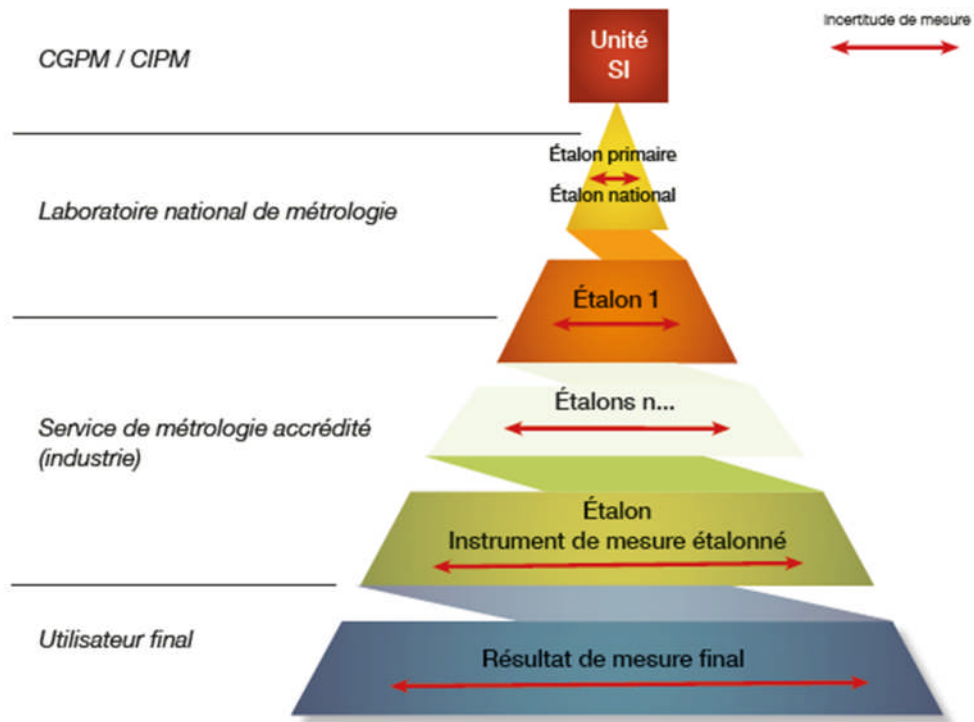


Fig.9 : Schéma de la chaîne de traçabilité métrologique

- ✓ En haut de la pyramide se trouve la référence ultime de l'unité : la définition des unités (IBM) bureau international de poids et mesures ;
- ✓ Ensuite, le laboratoire national de métrologie qui assure la réalisation et la mise en pratique de cette définition à l'échelle nationale avec le meilleur niveau d'incertitude possible. Ceci est vrai pour les unités de base et les unités dérivées ;
- ✓ Puis, suit dans la chaîne des laboratoires accrédités qui mettent en place des instrumentations qui garantissent le raccordement ininterrompu avec la référence du laboratoire national.

De haut en bas de la pyramide, on trouve donc un nombre de raccordements de plus en plus conséquent (largeur de la pyramide), qui reflètent la quantité d'étalons de références disponibles, associés à des incertitudes de plus en plus larges. On peut décliner cette chaîne de traçabilité pour chacune des unités du SI.

L'incertitude requise pour une mesure donnée est d'abord celle qui répond au besoin. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer des mesures directement raccordables aux laboratoires nationaux de métrologie (requête à laquelle ces laboratoires ne pourraient accéder compte tenu de leurs moyens), d'où la nécessité de disposer d'un ensemble de laboratoires, dits accrédités, permettant

de réaliser ces mesures sur des champs d'application plus restreints. Afin de garantir les mesures ainsi réalisées, la notion de traçabilité est indispensable.

1.8. Différentes axes de compétences de la métrologies

La métrologie comprend trois grands axes de compétence ; la métrologie scientifique, industrielle et la métrologie légale.

1.8.1. La métrologie fondamentale ou scientifique

Le terme de métrologie scientifique est employé dans le cadre de la définition des unités de mesure. C'est ce qui permet d'avoir un langage universel pour l'expression de la mesure d'une grandeur. Ensuite, ces unités sont matérialisées par des références que l'on appelle « étalon primaires ». Elle traite l'organisation et le développement des étalons de mesures et de leur maintien à niveau dans des laboratoires dits primaires, tels que le LNE.

La Métrologie fondamentale ou scientifique couvre tous les aspects généraux théoriques et pratiques relatifs aux unités de mesure, aux étalons de mesure, aux méthodes scientifiques et aux résultats de mesure y compris (calculs d'erreur et d'incertitude de mesure) ainsi que les problèmes des propriétés métrologiques des instruments de mesure. Elle englobe différents domaines de spécialité, par exemple :

- ✓ La métrologie des masses, qui traite de la mesure des masses ;
- ✓ La métrologie dimensionnelle, qui traite de la mesure des longueurs et des angles ;
- ✓ La métrologie thermique, qui traite de la mesure des températures ;
- ✓ La métrologie électrique, qui traite des mesures électriques ;
- ✓ La métrologie chimique, qui traite des mesures en chimie.

1.8.2. La métrologie légale

C'est l'ensemble des règles et exigences légales et réglementaire imposées par l'Etat concernant le système national d'unités (unités légales, la fabrication et l'utilisation des instruments de mesure utilisés dans le domaine du commerce, de la santé, de la sécurité et la protection de l'environnement. On parle souvent de métrologie légale lorsque la mesure est utilisée pour des transactions commerciales. Cette métrologie a pour missions de :

- ✓ Assurer la fiabilité des mesures et prévenir les fraudes ;
- ✓ Permettre aux industriels de disposer d'instruments adaptés à leurs besoins ;
- ✓ Soutenir la performance et la compétitivité des fabricants nationaux d'instruments de mesure ;
- ✓ Permettre, par le biais de l'OIML, les transactions commerciales vers l'international.

Exemple de familles d'instruments pouvant faire l'objet d'une métrologie légale :

Balances, Analyseurs de gaz (CO₂, CO), Pompes à essence...

1.8.3. La métrologie industrielle

La métrologie industrielle est la plus utilisée actuellement, car elle correspond à une métrologie efficace et adaptée aux besoins de l'entreprise, suivant les domaines d'activités (agro-alimentaire, automobile, métallurgie, électronique, chimique ...).

Elle doit assurer le fonctionnement adéquat des instruments de mesure utilisés dans l'industrie, comme dans la production et les processus d'essais. Elle traite des mesures applicables aux contrôles de la production et aux contrôles de qualité.

La métrologie industrielle couvre toutes les activités métrologiques dans l'entreprise telles que le contrôle des processus de mesure, la gestion des instruments de mesure dans l'industrie, les procédures de vérification/étalonnage (traçabilité des mesures) afin d'assurer leur conformité aux exigences propres à leur utilisation prévue.

1.9. Rôle de la fonction métrologie dans l'entreprise

La métrologie industrielle, consiste à organiser l'ensemble des ressources métrologiques de l'entreprise dans le but de :

- ✓ maîtriser les caractéristiques de ses instruments (étalonnage),
- ✓ maîtriser les performances des opérateurs (formation),
- ✓ maîtriser les spécificités de ses produits (le métier),
- ✓ maîtriser les exigences de ses clients (la relation commerciale),
- ✓ maîtriser les exigences de son (sa) référentielle qualité (l'excellence).

Finalement, la maîtrise de la mesure dans le cadre de la métrologie industrielle, permet de :

- ✓ maîtriser la conformité des produits,
- ✓ maîtriser les coûts,
- ✓ garantir une meilleure rentabilité,
- ✓ augmenter la satisfaction du client.

A l'inverse de la Métrologie Légale, la métrologie industrielle doit garantir, non pas l'honnêteté et l'égalité de l'échange, mais la fonctionnalité du produit dans un contexte économique souvent difficile. Pour cela, elle dispose d'un certain nombre de normes qui l'aide dans sa démarche.

1.10. Instituts et Organismes internationaux liés à la métrologie

La coordination internationale dans le domaine de la métrologie est l'une des tâches primordiales du BIPM, sous les auspices du CIPM et en collaboration avec les laboratoires nationaux de métrologie. L'aide qu'y apportent les membres du personnel hautement qualifié du BIPM est précieuse pour assurer l'efficacité de l'infrastructure métrologique internationale.

a) 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 Suisse)

b) Organismes internationaux de métrologie

- ✓ **OIML** : Organisation Internationale de Métrologie Légale
- ✓ **BIPM** : Bureau International de Poids et De Mesure
- ✓ **Metrologia** : Revue internationale sur les aspects scientifiques de la métrologie

c) Instituts de normalisation

- ✓ **INAPI** : Institut National De La Propriété Industrielle (qui gère les normes en Algérie)
- ✓ **OANM**:Organisation Arabe des Normes et Mesures (participent la totalité des pays arabes)
- ✓ **AFNOR** : association française de normalisation
- ✓ **CEN** : Comité Européen de Normalisation
- ✓ **DIN** : Deutsche institut fur normung
- ✓ **NBN** : Bureau de Nationalisation (organisation belge responsable de la réalisation et publication des normes en Belgique)
- ✓ **ISO** : International System Organisation

d) Organismes d'accréditation

- ✓ **BELAC/BELTEST** : Organisation Belge D'accélération
- ✓ **COFRAC** : le Portail Français de L'accélération
- ✓ **DKD** : Deutscher Kalibrierdienst
- ✓ **EA** : Européen Coopération For Accélération
- ✓ **ILAC** : International Laboratory Accreditation Cooperation

1.10.1 Principaux organismes de normalisation

Les principales organisations internationales de normalisation viennent d'adopter une approche concertée de l'intégration des techniques brevetées dans les normes. Dans le cadre de la World Standards Cooperation (WSC), la Commission électrotechnique internationale (IEC), l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et l'Union internationale des télécommunications (UIT) ont harmonisé leurs politiques, qui permettent aux sociétés commerciales de faire connaître les résultats de leurs travaux de recherche-développement en ayant l'assurance que leurs droits de propriété intellectuelle seront respectés.

Par ailleurs, les trois organisations membres de la WSC disposent chacune d'une base de données en ligne sur les brevets, afin de faciliter les travaux des organismes de normalisation et d'aider les entreprises qui souhaitent mettre en œuvre des normes ou des recommandations internationales incorporant des techniques brevetées.

1.10.1.1 L'Organise de l'UIT

Principale institution des Nations Unies chargée des questions relatives aux technologies de l'information et de la communication, l'UIT est l'instance mondiale où pouvoirs publics et secteur privé se rencontrent pour développer les réseaux et les services. Depuis plus de 140 ans, elle coordonne l'utilisation en partage du spectre des fréquences radioélectriques au niveau mondial, encourage la coopération internationale en attribuant des orbites de satellites, s'emploie à renforcer l'infrastructure des télécommunications dans les pays en développement et définit des normes mondiales qui garantissent la parfait interconnexion de systèmes de communication très divers.

L'UIT organise également des expositions et des forums mondiaux et régionaux de télécommunication qui rassemblent les plus éminents représentants des secteurs public et privé et favorisent les échanges d'idées, de connaissances et de technologies, dans l'intérêt de la communauté internationale et, en particulier, des pays en développement.

De l'Internet large bande aux technologies hertziennes les plus récentes, de la navigation aéronautique et maritime à la météorologie par satellite en passant par la radioastronomie, des services de téléphonie et de télécopie aux réseaux de la prochaine génération en passant par la radiodiffusion télévisuelle, l'UIT continue à jouer un rôle essentiel en aidant les pays du monde à communiquer.



Fig.10 : Le logo de l'union internationale des télécommunications UIT créée en 1947.

1.10.1.2 L'Organise de la IEC (International Electrotechnical Commission)

La IEC, dont le siège est à Genève (Suisse), est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées, domaine désigné par le terme générique "**électrotechnologie**".

Les normes de la IEC portent sur des technologies aussi diverses que la production, la transmission et la distribution de l'électricité, les appareils ménagers et l'équipement bureautique, les semi-conducteurs, les fibres optiques, les batteries, les systèmes d'affichage à écran plat et l'énergie

solaire, pour n'en citer que quelques-unes. Dès qu'il est question d'électricité et d'électronique, il est aussi question des travaux de la IEC en faveur de la sécurité et de la qualité de fonctionnement, de l'environnement, de l'utilisation efficace de l'électricité et des énergies renouvelables.



Fig.11 : Logo de l'International Electrotechnical Commission)

1.10.1.3. L'Organise de l'ISO

L'ISO est un réseau mondial d'instituts nationaux de normalisation de 156 pays. A ce jour, elle a publié quelque 16 500 normes destinées à l'industrie, aux pouvoirs publics et à la société dans son ensemble. Les normes de l'ISO constituent une offre complète pour les trois volets ; économique, environnemental et social du développement durable. Elles apportent des solutions et des avantages à quasiment toutes les branches d'activité ; agriculture, bâtiment, ingénierie mécanique, fabrication, grande distribution, transports, dispositifs médicaux, technologies de l'information et de la communication, environnement, énergie, gestion de la qualité, évaluation de la conformité et services.



Fig.12 : Logo de l'organisation internationale de normalisation ISO.

1.11. Définition de la métrologie selon l'ISO

La métrologie consiste à gérer la préparation et l'exécution des opérations de mesurage afin de garantir les résultats de mesure, leur traçabilité et leur incertitude. La métrologie permet notamment de choisir la méthode et l'instrument de mesurage appropriés au niveau de précision recherché. Pour un client, deux éléments entrent en ligne de compte :

- ✓ La qualité du produit, dont il attend d'être satisfait,
- ✓ L'assurance de la qualité de l'entreprise dans laquelle il attend d'avoir confiance et qu'elle rende sûre l'obtention de la qualité du produit.

Dans le contexte économique, il convient de ne pas produire plus, mais de produire mieux.

1.11.1. Rappels sur les normes de qualités I.S.O. 9000

Une norme est un document officiel réalisé par un organisme agréé. La normalisation est la rédaction de ces normes. Les établissements qui rédigent les normes sont appelés organisme de normalisation. Chaque pays a son propre organisme de normalisation. Les plus connus sont :

- ✓ l'Association française de normalisation AFNOR en France ;
- ✓ l'American National Standards Institute ANSI aux États-Unis ;
- ✓ le Deutsches Institut für Normung DIN en Allemagne ;
- ✓ l'Institut belge de normalisation NBN en Belgique ;
- ✓ le British Standards Institution BSI au Royaume-Uni ;
- ✓ l'Office fédéral de Métrologie METAS en Suisse,..... ;
- ✓ L'Organismes Internationale de Normalisation ISO qui regroupe tous les organismes nationaux de normalisation.

Notons que ces organismes nationaux sont, dans leur grande majorité, privés (l'Afnor par exemple est une association type loi 1901) et que les normes qu'ils éditent sont payantes.

Dans le domaine de la gestion intégrale de la qualité, on distingue 5 normes ISO différentes:

a) L'ISO-9000 : n'est pas une norme au sens strict du terme ; elle définit, en fait, un cadre général et donne les lignes directrices pour la sélection et l'utilisation des autres normes dont elle fournit une brève description ;

b) L'ISO-9001 : présente un modèle d'assurance-qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées. Cette norme est la plus poussée des normes ISO-9000 et fournit un modèle total ;

c) L'ISO-9002 : régit la production, l'installation et les prestations associées ; cette certification est visée surtout par les entreprises qui ne développent pas de produits et de service à la clientèle ;

d) L'ISO-9003 : offre un modèle d'assurance-qualité en contrôle et essais finals ; cette certification fournit la preuve officielle que le contrôle final et les essais finals ont été correctement effectués ;

e) L'ISO-9004 : fournit aux entreprises des directives pour mettre en place un système de gestion de la qualité ; cette norme correspond en fait à un manuel détaillé. En résumé, trois normes contiennent des modèles d'application (9001, 9002 et 9003) tandis que les normes 9000 et 9004 servent plutôt de guide à l'application des trois autres normes. Elles offrent une bonne base pour se faire une idée de la gestion intégrale de la qualité.

1.12. Réseau Maghrébin de Métrologie (MAGMET)

C'est le réseau des institutions maghrébines (Mauritanie, Maroc, Algérie et Tunisie) de métrologie ayant pour objectif la promotion de la qualité des services métrologiques au niveau de la région.

Le Mémoire d'entente a été signé par les trois pays (Maroc, Algérie et Tunisie) le 02 juillet 2008 à l'occasion de la première réunion de l'Assemblée Générale de l'Organisation Africaine de Métrologie d'AFRIMETS tenue à Tunis.

La première Assemblée Générale de MAGMET s'est réunie à Tunis le 21 et 22 mai 2009 à l'occasion de la journée mondiale de Métrologie. Durant cette assemblée générale, la Mauritanie a signé le Mémoire d'entente de MAGMET. Le MAGMET est membre du Comité exécutif de l'Organisation Africaine de Métrologie d'AFRIMETS représenté par la Tunisie à travers le Ministère de l'Industrie et de la Technologie. Les missions de MAGMET est de :

- ✓ Favoriser l'échange d'expériences, d'informations et d'experts et coordonner les actions de formation ;
- ✓ Harmoniser les règlements techniques et les méthodes d'étalonnage, de mesurages et de vérification des instruments de mesure ;
- ✓ Assister les pays de l'UMA à la mise en place des chaînes nationales d'étalonnage ;
- ✓ Organiser et réaliser des comparaisons inter laboratoires à l'échelle régionale et participer aux comparaisons inter laboratoires internationales ;
- ✓ Optimiser l'utilisation des ressources et des services dont disposent les membres et favoriser leurs orientations vers la satisfaction des besoins métrologiques identifiés ;
- ✓ Développer les reconnaissances mutuelles intermaghrébines ;
- ✓ Sensibiliser les opérateurs socio-économiques sur le rôle de la métrologie dans l'industrie, le commerce et la vie des citoyens ;
- ✓ Participer aux réunions et travaux des organisations et instances régionales et internationales en la matière ;
- ✓ Promouvoir la recherche scientifique et technologique dans le domaine de la métrologie ;
- ✓ Coopérer étroitement avec les organismes régionaux d'infrastructures qualité



Fig.13 : Logo du reseau maghrebin de metrologie (MAGMET)

1.13. Histoire de la metrologie en Algerie

- ✓ Avant 1962 : Service des Poids et Mesures.
- ✓ 1962 à 1980 : Service des instruments de Mesure (rattachés aux directions de l'Industrie et de l'énergie).

- ✓ 1980 à 1986 : Sous-direction des instruments de mesure de wilaya.
- ✓ 1986 : Création de l'Office National de Métrologie Légale.
- ✓ 2002 : Conseil National de Métrologie créé par décret exécutif No 02-220 du 20 juin 2002

Le système national de métrologie repose sur les textes législatifs et réglementaires suivants:

- ✓ La loi N° 90-18 du 31 juillet 1990 ;
- ✓ Décret exécutif n°91-537 du 25 décembre 1991 ;
- ✓ Décret exécutif n°91-538 du 25 décembre 1991 ;
- ✓ Décret exécutif n°91-539 du 25 décembre 1991 ;
- ✓ Décret exécutif n°02-220 du 09 Rabie Ethani 1423 Arrêtés Ministériels.

L'Algérie est membre de l'Organisation Internationale de la métrologie Légale (OIML) par ordonnance N° 76-15 du 20 février 1976.



Fig.14 : Logo de quelques organismes liées à la métrologie en algerie.

Ch.II. Métrologie industrielle

II.1. introduction

La métrologie permet de garantir la qualité des mesures dans l'industrie. La responsabilité des entreprises qui fabriquent ces appareils est donc immense vis-à-vis des utilisateurs, présents dans tous les secteurs de l'industrie. L'avènement de l'usine du futur bouleversant les usages, les technologies de mesure deviennent ou vont devenir une clé de valorisation importante pour beaucoup d'entreprises.

Les activités de mesure, d'étalonnage, et tout ce qui englobe la métrologie ont une incidence qu'on soupçonne mal : elles permettent de créer, pour les utilisateurs mais aussi pour les clients finaux, la confiance. Cette confiance est vitale, surtout dans des procédés de fabrication complexes faisant intervenir plusieurs mesures. Sans cela, c'est toute la chaîne de fabrication qui se trouve fragilisée, au minimum. C'est pour cela que le domaine de la métrologie est extrêmement réglementé, et que des institutions comme le laboratoire national d'essais et de mesure (LNE) ou le collège français de métrologie (CFM), interrogés dans ce dossier, ont un rôle capital.

La métrologie est un domaine transversal à toute l'industrie. Les nouvelles technologies permettant une captation quasi complète des datas émises, leur analyse et leur exploitation, donnent à la mesure une dimension nouvelle. L'usine du futur, sujet à la mode mais véritable défi pour toutes les entreprises industrielles, permet d'incarner l'écosystème qui accueillera cette nouvelle métrologie. Pour quelles finalités ? D'abord une amélioration de la performance industrielle, dans son ensemble : contrôle qualité, contrôle de la chaîne de production, de fabrication...

Les conséquences pour l'ensemble de l'activité sont potentiellement gigantesques. Une fois que l'on a dit cela, il faut se projeter sur les infrastructures à mettre en place pour rendre effectif ces nouveaux usages. C'est bien le problème avec tout ce qui concerne l'usine du futur : le passage du théorique au réel. Dans l'usine du futur, toutes les technologies doivent être implémentées ensemble de manière cohérente pour prendre sens. C'est à cette condition que la « nouvelle » métrologie prendra tout son sens, pour alimenter une nouvelle vision de la performance industrielle.

II.2. Rôle de la métrologie industrielle

Elle couvre un vaste secteur qui ne s'adresse plus uniquement aux industries, comme c'était le cas à ses origines, et auxquelles elle doit son nom. Elle contribue fortement à la qualité des produits ou des services fournis, et constitue une composante indivisible de toute démarche qualité qu'elle soit accréditée, certifiée, volontaire, ou même réglementaire. De nos jours, un des enjeux majeurs

de la qualité et de la compétitivité dans les entreprises repose sur la maîtrise des processus de fabrication des produits ou d'élaboration des services. L'exactitude et la fiabilité des résultats des mesures réalisées dans ces processus contribuent beaucoup à cette maîtrise et par conséquent, à l'assurance d'un haut niveau de la qualité des produits ou services fournis.

Ce concept simple adopté par les industries au début de l'ère industrielle permettait d'assurer qu'une pièce d'un produit, fabriquée par une entreprise située dans un point A, pourrait être assemblée sans problème avec une autre pièce de produite en un point B. On peut à ce titre dire que la métrologie industrielle était une sorte de langage universel pour les industries. Ce langage universel, s'est beaucoup développé depuis puisque 105 pays (tendance toujours croissante) l'ont adopté officiellement de nos jours. Le point commun de la métrologie industrielle mondiale est le système international d'unités.

II.3. Organisation d'une chaîne d'étalonnage

Au niveau international, les décisions concernant le Système international d'unités (SI) et les recommandations concernant la réalisation des étalons primaires sont prises en compte par la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) est en charge de coordonner et maintenir les étalons internationaux actuels (kilogramme et temps atomique international) et d'organiser les comparaisons clés inter-laboratoires au plus haut niveau.

Le principe fondamental de la traçabilité consistant à relier la mesure « prise dans le sens le plus général » à des étalons appropriés, la plupart des pays industrialisés ont de ce fait mis en place des chaînes d'étalonnage qui assurent cette fonction, au moins pour les besoins en mesure les plus exacts, pour les instruments qui sont considérés comme étalons de référence ou pour ceux qui contribuent à garantir la qualité d'un produit ou d'un résultat d'essai. Ces chaînes d'étalonnage s'appuient, au plus haut niveau, sur un ou plusieurs laboratoires nationaux de métrologie dont les missions principales sont de réaliser, d'améliorer et de conserver les références nationales. Celles-ci sont, en principe, directement réalisées par rapport aux définitions du Système International d'Unités.

La figure 15, illustre le schéma directeur d'une chaîne d'étalonnage industrielle : Au niveau supérieur (1) ; le laboratoire national chargé de la conservation des étalons nationaux, dits ici primaires, au niveau intermédiaire (2) ; les organismes accrédités à effectuer le transfert vers l'industrie par des étalons dits secondaires enfin au niveau inférieur (3) ; les opérationnels soit les industriels et les laboratoires de métrologie qui doivent faire étalonner leurs étalons de référence et autres instruments ne pouvant être étalonnés dans leur propre métrologie.

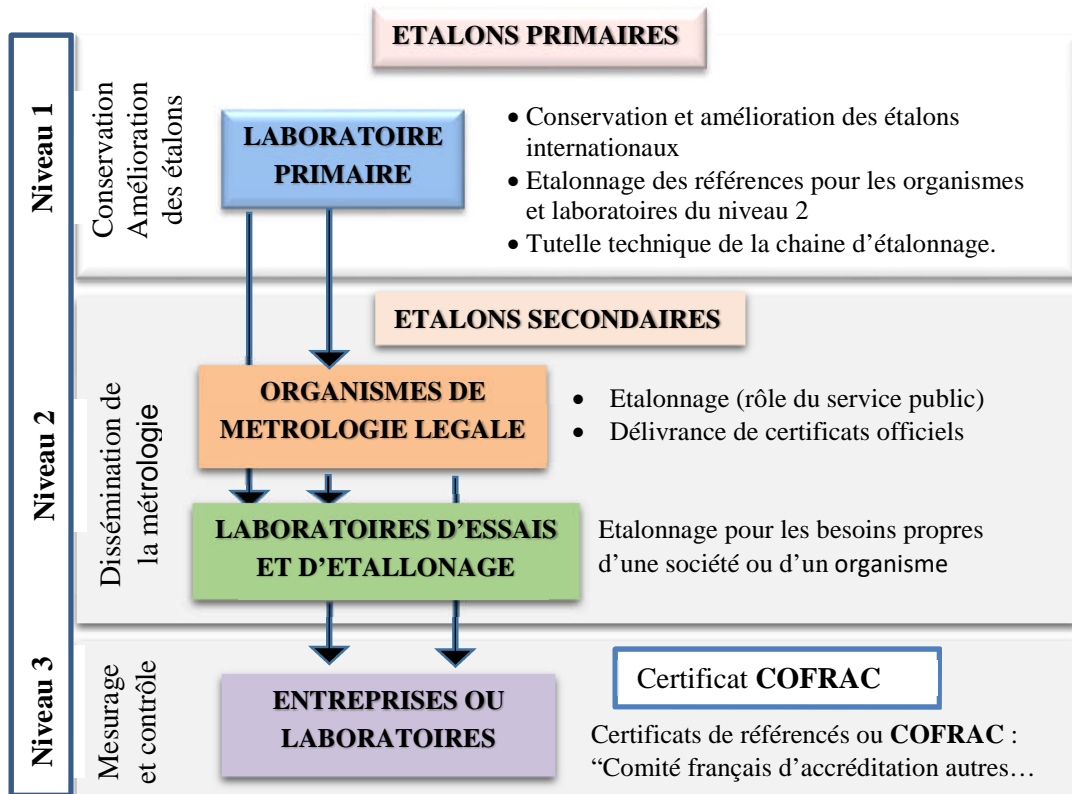


Fig.15 : Schéma directeur d'une chaîne d'étalonnage industrielle.

II.3.1. Étalon primaire

Un étalon primaire une référence avec une qualité métrologique la plus pure, la plus haute. Cela peut être un objet physique ou une création par convention internationale. Il n'est jamais utilisé pour des mesures directes.

Exemple : l'IPK (International Prototype of the Kilogramme) :



Fig.16 : L'étalon primaire du kilogramme en platine iridium cylindrique.

- Ce prototype est fabriqué en un alliage de platine et d'iridium ;
- Dimensions : diamètre = hauteur = 39,17 mm ;
- Ses côtés possèdent un quadruple chanfrein pour minimiser l'usure ;
- Forte résistance à l'oxydation ;

- Très haute masse volumique (presque deux fois plus dense que le plomb et 21 fois plus que l'eau) ;
- Conductivité électriques et thermiques satisfaisantes ;
- Faible susceptibilité magnétique.

II.3.2. Étalon de références

Étalon, en général de la plus haute qualité métrologique, conçu pour l'étalonnage d'autres étalons de grandeurs de même nature dans une organisation donnée ou en un lieu donné.

3.3. Etalon secondaire

C'est un étalon établi par l'intermédiaire d'une comparaison à un étalon primaire mesurant la même grandeur physique.

II.3.4. Étalon de travail (de contrôle)

Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

II.4. Système international d'unités (SI)

Inspiré du **système métrique**, c'est le système d'unités le plus largement employé du monde. Il s'agit d'un système d'unités décimal (on passe d'une unité à ses multiples ou sous-multiples à l'aide de puissances de 10). C'est la Conférence générale des poids et mesures, rassemblant des délégués des états membres de la Convention du Mètre, qui décide de son évolution, tous les quatre ans, à Paris. L'abréviation de « Système International » est SI, quelle que soit la langue utilisée. La norme internationale **ISO 1000 (ICS 01 060)** décrit les unités du Système International et les recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités.

II.4.1. Unités de base

Les définitions des unités de base du système international utilisent des phénomènes physiques reproductibles. Seul le kilogramme est encore défini par rapport à un objet matériel susceptible de s'altérer. Actuellement, des recherches ont donc lieu pour remplacer cette définition par une autre, utilisant cette fois un phénomène physique. À l'issue de ces recherches, le kilogramme pourrait perdre son statut d'unité de base au profit d'une autre unité : c'est en effet seul le nombre d'unités fondamentales qui est imposé, puisqu'elles doivent permettre, par combinaison, de mesurer toute grandeur physique connue sans définition redondante, mais le choix précis des unités fondamentales comme les unités de masse, longueur, temps, courant électrique, température, intensité lumineuse et quantité de matière est purement arbitraire.

Tableau 2 : Illustration des principales unités de base.

Grandeur	Symbole	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Définition, Remarques
Longueur	l	mètre	m	Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299792458 de seconde. Historiquement, la première définition officielle et pratique du mètre (1791) était basée sur la circonférence de la terre, et valait 1/40000000 d'un méridien. Auparavant, le mètre en tant que proposition d'unité décimale de mesure universelle était défini comme la longueur d'un pendule qui oscille avec une demi-période d'une seconde.
Masse	m	kilogramme	Kg	Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme. Ce dernier, composé d'un alliage de platine et d'iridium (90%-10%), est conservé au Bureau international des poids et mesures à Sèvres, en France. Historiquement, la définition du kilogramme était la masse d'un décimètre cube d'eau (un litre).
Temps	t	seconde	s	La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température de 0 kelvin. La seconde était à l'origine basée sur la durée du jour terrestre, divisé en 24 heures de 60 minutes, chacune d'entre elles durant 60 secondes (soit 86 400 secondes pour une journée)
Quantité de matière	n	mole	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. Ce nombre d'entités élémentaires est appelé nombre d'Avogadro. Lorsque l'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.
Température	T	kelvin	K	Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

Intensité lumineuse	Iv	candela	cd	La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l' intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ watt par stéradian.
Courant électrique	I	Ampère	A	L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux 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.

Certaines unités fondamentales utilisent d'autres unités fondamentales dans leur définition, parfois *via* des unités dérivées (la définition de la seconde utilise par exemple celle du kelvin). Les unités fondamentales ne sont donc pas strictement indépendantes les unes des autres, mais telles sont les grandeurs physiques qu'elles permettent de mesurer qui le sont.

II.5. Technique Contrôle

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

- ✓ Au contrôle des pièces exécutées au cours de l'usinage ;
- ✓ Au contrôle sur machine de la position de la pièce par rapport à l'outil ;
- ✓ A la vérification géométrique des machines-outils ;
- ✓ Au contrôle statistique des performances possibles sur chaque machine-outil
- ✓ En maintenance, la métrologie s'intéresse :
- ✓ Au contrôle des organes du système usinant pouvant subir une usure ou une déformation due au fonctionnement.

II.6. Conditions de mesures

Les conditions dans lesquelles une mesure doit être prise sont d'une importance capitale et toute manipulation ne respectant pas les conditions optimales peut engendrer des erreurs sur la prise de mesure. Pour cela il faut respecter les conditions suivantes :

- Les instruments de mesure et le milieu ambiant dans laquelle s'effectuent les mesures doivent avoir une température avoisinant les 20°C ;
- La pièce à contrôler doit être propre et sans ébavurage excessive ;
- La manipulation doit être bien soignée en évitant les chocs ;
- Les instruments de mesure doivent être appropriés et régulièrement entretenus ;
- Veiller à ranger les instruments de mesure après chaque usage.

II.6.1. Instruments de mesure/contrôle mécaniques

Aucun moyen de production de pièces ne permet d'obtenir des cotes rigoureusement exactes ou des surfaces géométriquement parfaites. La métrologie est l'ensemble des opérations nécessaires pour déterminer avec précision la valeur d'une grandeur à mesurer au pour réaliser un contrôle. Elle est la science et technique de la mesure, elle permet de s'adapter aux exigences changeantes des marchés tout en respectant les règles les plus précises sur les caractéristiques du produit et de sa fabrication.

On trouve trois types de technique de mesure : mesurage dimensionnel ; mesurage géométrique ; mesure surfacique.

II.6.2. Qualités métrologiques des instruments de mesures

La qualité de la recherche ne dépend pas uniquement du schéma opératoire, mais aussi de la qualité métrologique des outils de mesure. Qu'ils soient développés à des fins de recherche ou adaptés et traduits dans une autre langue, les outils de mesure doivent être fidèles et valides. Toute mesure prend forme à partir de la question de recherche et des définitions conceptuelle et opérationnelle des concepts à l'étude.

La fidélité et la validité sont des caractéristiques essentielles de tout instrument de mesure se distingue dans ce qui suit :

a) Etendue de mesure : C'est l'ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour lesquelles l'instrument donne une valeur avec une erreur inférieure ou égale à l'erreur maximale tolérée.

b) Sensibilité d'un instrument de mesure : Rapport k entre l'accroissement de la variable observée (dl) et l'accroissement réel de la grandeur mesurée (dG). $k = dl/dG$

c) Justesse d'un instrument de mesure : Qualité d'un instrument de mesure à donner des indications égales à la valeur vraie de la grandeur mesurée.

d) Fidélité d'un instrument de mesure : Aptitude d'un instrument de mesure à donner toujours la même indication pour une même valeur de la grandeur mesurée.

e) Précision d'un instrument de mesure : Qualité globale caractérisant l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur de la grandeur à mesurer.

f) Constance d'un instrument de mesure : Qualité caractérisant l'aptitude d'un instrument de mesure à concerner des qualités métrologiques constantes en fonction du temps.

II.6.3. Classification des instruments de mesure

La mesure est une étape cruciale dans l'acquisition scientifique de la connaissance et l'instrument de mesure est un composant incontournable de tout système de mesure. La qualité d'une mesure est donc de façon primordiale déterminée, d'une part, par le choix judicieux de l'instrument et,

d'autre part, par l'exploitation pertinente de leurs qualités métrologiques. Un appareil de mesure comporte un ou plusieurs dispositifs d'amplification mécanique ou électronique, probablement des transmetteurs et des transformateurs de mouvement, et certainement un dispositif d'affichage et de lecture du résultat du mesurage. Les moyens de contrôle et de vérification se divisent en deux grandes classes : les instruments de mesure à dimensions variables et les vérificateurs à dimensions fixes :

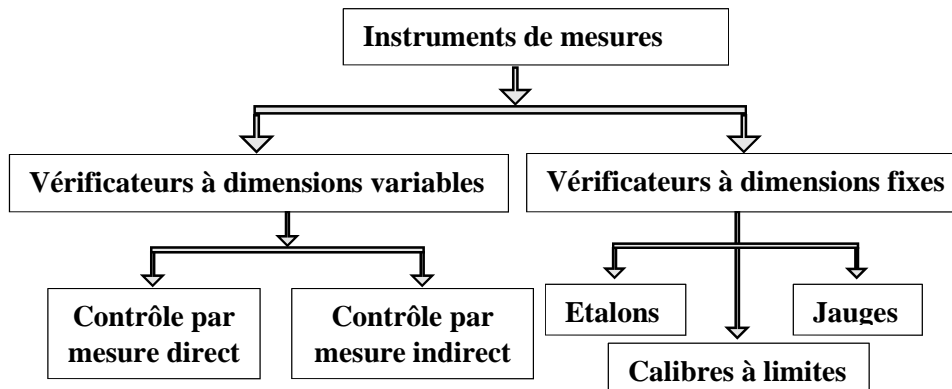


Fig.17 : Classification des instruments de mesure.

II.7. Les instruments de mesure à dimensions variables

Sont divisés en instruments par comparaison et instruments de mesure directe (par affichage). Les instruments par comparaison produisent une représentation de la taille de la mesure, la distance fixe entre deux surfaces (cales étalon) ou la position d'un angle entre deux surfaces (rapporteur). Les instruments par affichage disposent de repères mobiles, de cadrans gradués ou de compteurs (aiguilles, vernier). La valeur de la mesure peut immédiatement être lue.

II.7.1 Contrôle par mesure direct

C'est une méthode de mesure dans laquelle la valeur d'une grandeur à mesurer est obtenue directement par lecture de la grandeur à mesurer.

II.7.1.1. Le pied à coulisse description

Le pied à coulisse est un instrument de mesure de précision en acier inoxydable, trempé. Il est constitué d'une règle graduée en mm possédant un bec à une extrémité, d'un coulisseau portant une graduation de vernier et possédant aussi un bec. Il est souvent utilisé pour contrôler ou mesurer des côtes dont l'intervalle de tolérance est supérieur ou égale à 0.04mm. Dans certains cas on peut aller jusqu'à un intervalle de tolérance égale à 0.02mm avec un pied à coulisse à cadran ou à afficheur numérique. Il sert à mesurer avec précision des petites longueurs : 150mm, 200mm et 250mm. La position de mesurage peut être stabilisée par la vis de blocage. Parfois appelé calibre à coulisse, il est constitué d'une règle graduée, de becs pour les mesures extérieures, de becs pour

les mesures intérieures et d'une vis de blocage. Une partie de cet outil est fixe tandis que l'autre est mobile, glissant sur un coulisseau,

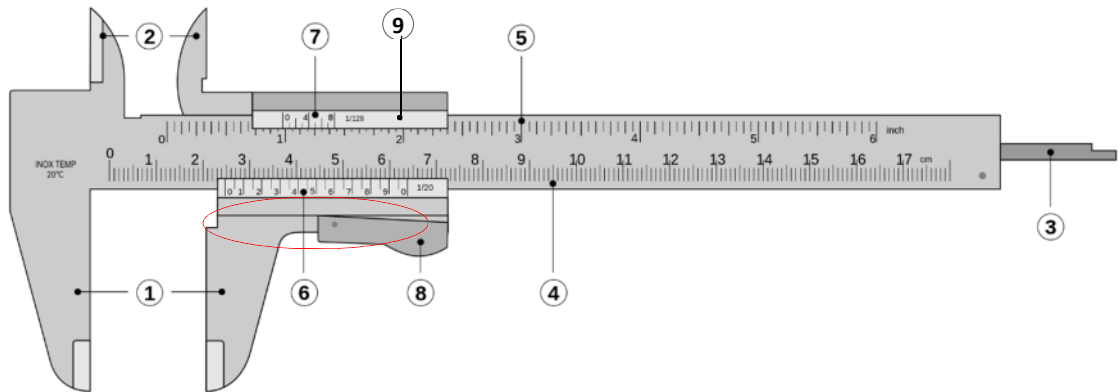


Fig.18 : Représentation d'un pied à coulisse

1. Les baillons pour les mesures externes avec lesquelles se mesurent des diamètres de vis ou de baguettes, et des longueurs des visages externes de pièces.
2. Bâillons pour les mesures internes que comme son propre nom indique, on utilise pour mesurer des zones internes comme trous, ou des longueurs entre des visages internes.
3. La baguette inférieure, grâce à laquelle on peut mesurer des profondeurs, bien que le trou soit étroit.
4. Règle graduée en mm qui constitue la partie fixe principale.
5. Graduation en inch.
6. Vernier Basé sur la juxtaposition de 2 règles graduées, une en mm et l'autre en fraction de mm.
7. Vernier pour mesurage à l'unité inch.
8. Poussoir, aide à déplacer et freiner le coulisseau dans la position de mesure.
9. Curseur pour déplacer la règle mobil par rapport à la règle fixe.

II.7.1.2. Différents types 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^{ème}, 1/20^{ème} ou 1/50^{ème} de mm. Le vernier complète donc la règle graduée en apportant une exactitude dans la mesure. Le calibre à coulisse permet une mesure dont la précision varie avec le type de vernier utilisé
 - 1/10^{ème} de mm précision de 0,1mm
 - 1/20^{ème} de mm précision de 0,05mm
 - 1/50^{ème} de mm précision de 0,02mm

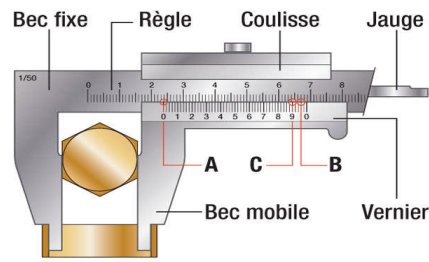


Fig.19 : Pied à coulisse à vernier.

- **Les pieds à coulisse à montre** : 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.



Fig.20 : Pied à coulisse à montre.

- **Les pieds à coulisse à lecture digitale** : Pour un affichage rapide dans un écran, souvent à cristaux liquides. Ils peuvent être dotés d'une touche de conversion afin de permettre la conversion des millimètres en inch (pouces), et vice versa. Idéals pour des mesures minutieuses grâce à l'électronique. Ils peuvent avoir différentes fonctions comme blocage de l'affichage, conservation des mesures en mémoire, transmission des données vers un ordinateur (grâce à une sortie de données).

Les pieds à coulisse numériques affichent directement la mesure avec un afficheur à cristaux liquides monté sur la partie coulissante. Ils utilisent le principe du potentiomètre linéaire. Ses principaux avantages sont :

- Une lecture directe avec une précision de $\pm 0,02$ mm ;
- Une remise à zéro du curseur à n'importe quelle position du bec ;
- Un enregistrement informatique via une prise RS232 pour permettre la réalisation de statistique ou autre.



Fig.21 : Pied à coulisse à lecture digitale

II.7.1.3. Echelle et résolution du vernier

Le vernier (du nom de son inventeur) est une réglette graduée apposée sur les pieds à coulisse et certains goniomètres (mesure d'angle). Elle permet d'améliorer la précision de lecture analogique. Le vernier fut inventé en 1631 par le mathématicien franc-comtois **Pierre Vernier**. Dans certaines langues, le dispositif porte le nom de **nonius**, nom latinisé de l'astronome et mathématicien portugais Pedro Nunes (1502-1578), qui avait inventé, avant Vernier, un système permettant de faire des mesures précises avec l'astrolabe.

On appelle résolution d'un appareil, la plus petite variante de la grandeur à mesurer que l'appareil a pu détecter. On dit que le pied à coulisse au $1/10^{\circ}$ a une résolution de 0,1mm ainsi celui au $1/20^{\circ}$ à une résolution de 0,05mm et le $1/50^{\circ}$ a une résolution de 0,02mm, finalement la résolution d'un appareil de mesure c'est la précision qu'il peut atteindre.

Le vernier du pied à coulisse doit répondre aux conditions suivantes pour assurer une lecture avec la précision exigée :

- Egalité de l'échelle de la règle coulissante avec l'échelle de la règle fixe à ces extrémités. La première ligne coïncide avec la dernière ligne ;
- Nombre différents de divisions entre les deux échelles dans la même distance de tel sorte que le nombre de division sur la règle coulissante soit égale au nombre de graduation de la règle fixe dans le même distance plus un 1 ;
- Quand une division de la règle coulissante est alignée avec celle de la règle fixe, aucune autre division ne coïncide ;
- C'est la règle coulissante qui doit se déplacer par rapport aux graduations de la règle fixe ;
- Pour prendre une lecture correcte, consiste à lire l'échelle fixe de son zéro jusqu'au zéro de l'échelle de la règle coulissante en comptant toutes les divisions entières sans les divisions partielles. Ensuite voir quelle ligne de l'échelle la règle coulissante s'aligne avec celle de l'échelle de la règle fixe et on ajoute cette valeur à l'échelle.

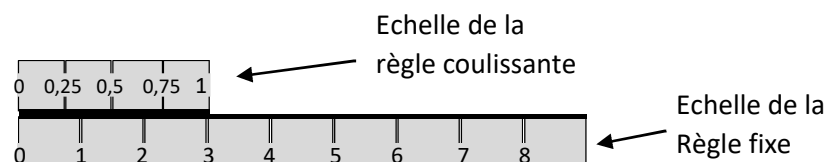
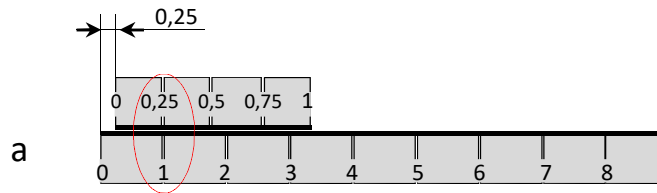


Fig.22 : Principe de division d'un vernier basic.

Lorsque la graduation 0,25 du coulisseau coïncide avec 1 de la règle, l'écart du déplacement mesure 0,25 (Figure 22a).



Lorsque la graduation 0,5 du coulisseau coïncide avec 2 de la règle, l'écart du déplacement mesure 0,5(Figure 22b).

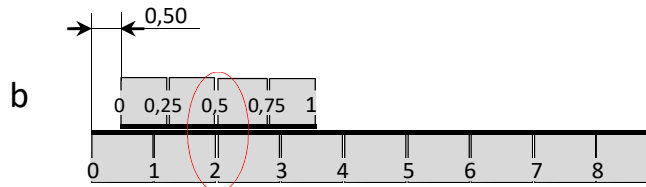


Fig.23 : Illustration de la lecture d'un vernier basic.

De la même manière pour le reste des graduations ; si 0,75 coïncide la lecture devient 0,75

II.7.1.4. Modèles de pieds à coulisse selon la resolution

En fonction du nombre de graduations qui se trouvent sur le vernier, la précision de lecture du pied à coulisse est :

Tableau 3 : Types de pieds à coulisse et précision

Nombre de graduation du vernier	10	20	50
Graduation de la règle	En millimètre de 0 à x (mm)	En millimètre de 0 à x (mm)	En millimètre de 0 à x (mm)
Précision de lecture du pied a coulisse	1/10 de millimetre	1/20 de millimetre	1/50 de millimetre

II.7.1.4.1. Pied à coulisse au dixième (1/10)

Principe : 10 graduations du vernier correspondent à 9 graduations de la règle

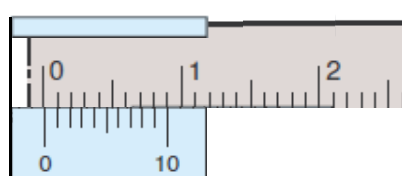
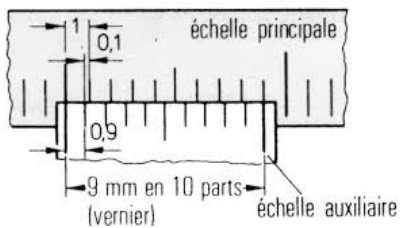


Fig.24 : Vernier au dixième (1/10)

Si un vernier d'une longueur totale de 9 mm porte 10 divisions égales, chacune d'elles mesure 0,9 mm, c'est 1 dixième de mm de moins que chaque graduation millimétrique de la règle graduée le long de laquelle il coulisse : on dit alors que le vernier est au dixième.

Valeur de l'ecart entre les graduations de la règle et du vernier :



- $9\text{mm} / 10 = 0,9\text{mm}$
- $1 - 0,9 = \mathbf{0,1\text{mm}}$
- La resolution du vernier au 10eme= $0,1\text{mm}$

Fig.25 : Méthode calcule de la résolution du vernier au dixième (1/10)

Exemple de lecture du pied a coulisse 1/10^e :

La lecture s'effectue généralement en deux temps :

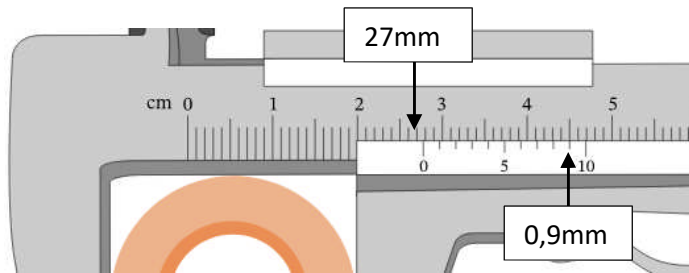


Fig.26 : Exemple de lecture du PAC au 10eme.

- Le zéro du vernier étant pris pour index, lire sur la règle la valeur de la graduation millimétrique qui s'y trouve en regard; si l'index coïncide exactement avec un trait millimétrique - par exemple 21 mm - cette unique lecture est suffisante et la mesure ne comporte pas de fraction.
- Si, par contre, le trait zéro du vernier est bloqué entre deux traits millimétriques de la règle - entre 27 et 28mm par exemple comme l'indique la figure 26 - la mesure de 27 mm devra être complétée par une seconde lecture donnant en dixièmes de millimètres, la valeur de la fraction d'appoint. On estime d'abord à vue cette fraction d'appoint (ce qui permet de limiter les tâtonnements et de localiser à peu près la deuxième lecture).
- On en trouve la valeur exacte en cherchant la division du vernier qui coïncide avec une division de la règle. Si cette division du vernier est la neuvième, la fraction d'appoint est de 0,9 mm et la dimension mesurée est de **27,9 mm**, soit une précision de 1/10^e.

II.7.1.4.2. Pied a coulisse au vingtième (1/20)

Principe : 20 graduations du vernier correspondent à 19 graduations de la règle (figure 27.a) et comme les graduations du vernier sont trop petit on augmente l'échelle à 20 graduation du vernier correspondent à 39 graduation de la regle (figure 27.b).

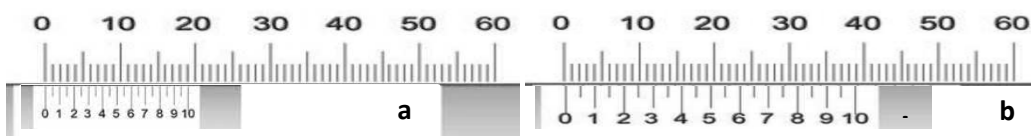


Fig.27 : Pied à coulisse au vingtième (1/20)

Dans ce type, deux fois plus précis que le précédent, le vernier, long de 19 ou 39 mm selon l'échelle choisie, est divisé en 20 parties. Chacune des 20 divisions qu'il comporte a donc un vingtième de mm de moins que les divisions de la règle. Selon la méthode de lecture décrite ci-dessus, on détermine alors la fraction d'appoint en vingtièmes de mm ou, ce qui est équivalent, en demi-dixièmes. Sur le pied à coulisse au $1/20^{\text{ème}}$, si 20 graduations du vernier correspondent à 19 mm de la règle, chaque graduation du vernier sera égale à :

$$19 / 20 = 0,95\text{mm} \rightarrow 1\text{mm} - 0,95\text{mm} = 0,05\text{mm soit } 1/20^{\text{ème}}$$

A échelle agrandie, si 20 graduations du vernier correspondent à 39mm de la règle chaque graduation du vernier sera égale à :

$$39/20 = 1,95\text{mm} \rightarrow 2\text{mm} - 1,95\text{mm} = 0,05\text{mm soit } 1/20^{\text{ème}}$$

Exemple de Lecture d'un vernier au vingtième ($1/20^{\text{e}}$)

La lecture s'effectue généralement en deux temps :

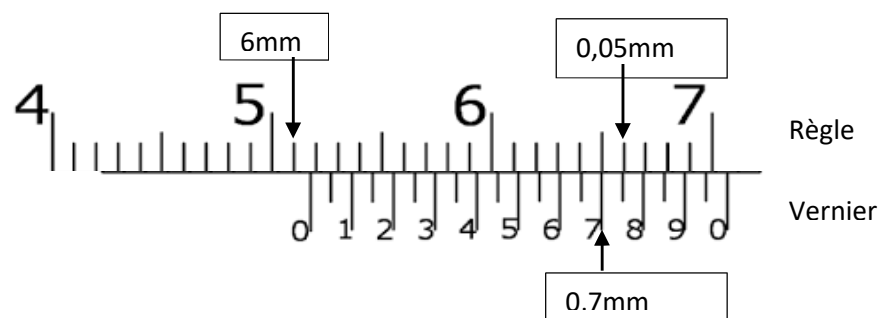


Fig.28 : Exemple de lecture d'un Pied à coulisse au vingtième ($1/20$).

Chaque graduation principale du vernier est divisée en deux par un trait plus court délimitant des demi-dixièmes intermédiaires (soit 5 centièmes). D'où la règle pratique la première lecture en mm, soit 6 mm, étant effectuée sur la règle, chercher la coïncidence d'un trait de la règle avec un trait du vernier.

- ✓ Si ce dernier est un grand trait, la fraction d'appoint se lit en dixièmes, sinon c'est le dernier trait avant la coïncidence soit, par exemple, le grand trait indique dans notre cas (0,7mm) avant le trait de la coïncidence,
- ✓ Si le trait de la règle qui coïncide avec le trait du vernier est un petit trait il se lit en centième soit dans ce cas c'est (0,05mm).
- ✓ La mesure exacte peut s'écrire et s'énoncer en centième, soit **6,75mm**

II.7.1.4.3. Pied à coulisse au cinquantième ($1/50^{\text{e}}$)

50 graduations du vernier correspondent à 49 graduations de la règle (figure 28). Dans ce type, plus précis encore que les précédents, le vernier, long de 49 mm est divisé en 50 parties. Chacune

des 50 divisions qu'il comporte a donc un cinquantième de mm de moins que les divisions de la règle. Selon la méthode de lecture décrite ci-dessus, on détermine alors la fraction d'appoint en cinquantième de mm ou, ce qui est équivalent à

$$49 / 50 = 0,98\text{mm}$$

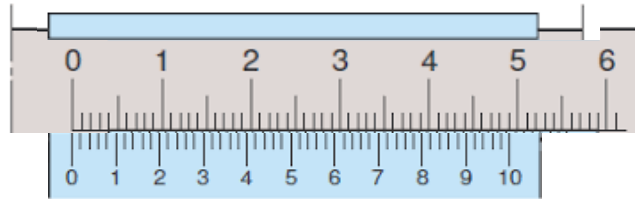


Fig.29 : Vernier au cinquantième (1/50).

La valeur de l'écart entre les graduations de la règle et du vernier :

$$1 - 0,98 = \mathbf{0,02\text{mm}}$$
 soit une précision de $2/100^{\text{e}}$ ou $1/50^{\text{e}}$.

Exemple de lecture d'un pied à coulisse au $1/50^{\text{e}}$ (figure 30) : Chaque graduation principale est divisée en quatre petits traits plus courts délimitant deux centième de mm (soit 0,02 mm). D'où la règle pratique (la première lecture en mm, soit **3** mm, étant effectuée) chercher la coïncidence d'un trait de la règle avec un trait du vernier.

- Si ce dernier est un grand trait, la fraction d'appoint se lit en dixièmes, soit, par exemple, le grand trait indique (0,4),
- Si le trait de la règle qui coïncide avec le trait du vernier est un petit trait il se lit en centième (dans notre cas il n'y a pas de coïncidence avec un petit trait).

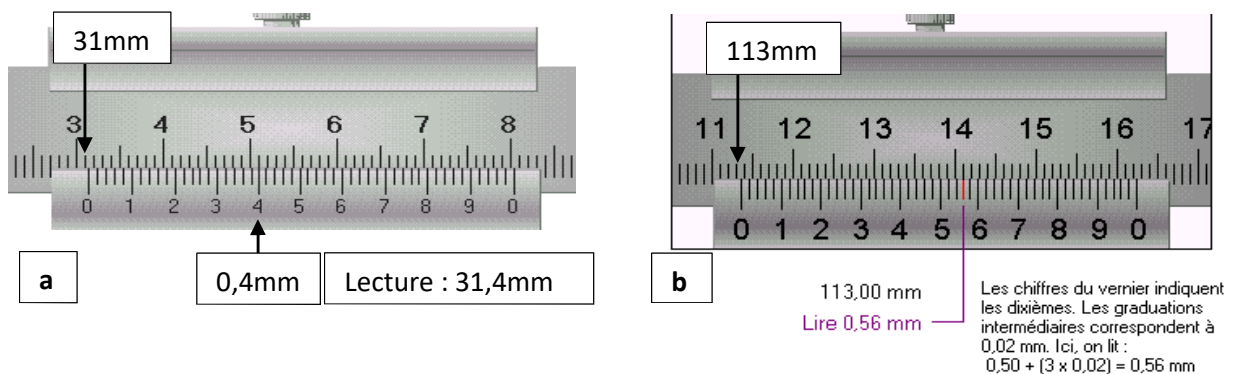


Fig.30 : Lecture d'un pied à coulisse au cinquantième $1/50^{\text{e}}$.

II.7.1.4.4. Principe de la précision

Pour vérifier la précision d'un pied à coulisse on procède comme suite :

- Le pied a coulisse doit être fermé bec contre bec.
- Déterminer le nombre de graduation présentes sur le vernier gradués et la correspondance avec la règle graduée.

Diviser le nombre obtenu sur la règle par le nombre obtenu sur le vernier pour avoir la précision

II.7.1.5. La jauge de profondeur

La jauge de profondeur fait partie des vérificateurs à dimensions variables et c'est une variante du calibre à coulisse. Elle se compose d'une règle graduée en millimètre coulissant sur une tête comportant une face plate permettant la mise en position et la détermination de la valeur mesurée. Elle permet la mesure des profondeurs et la méthode de lecture utilisée est strictement identique au pied à coulisse selon le type de lecture analogique ou à cristaux liquide.

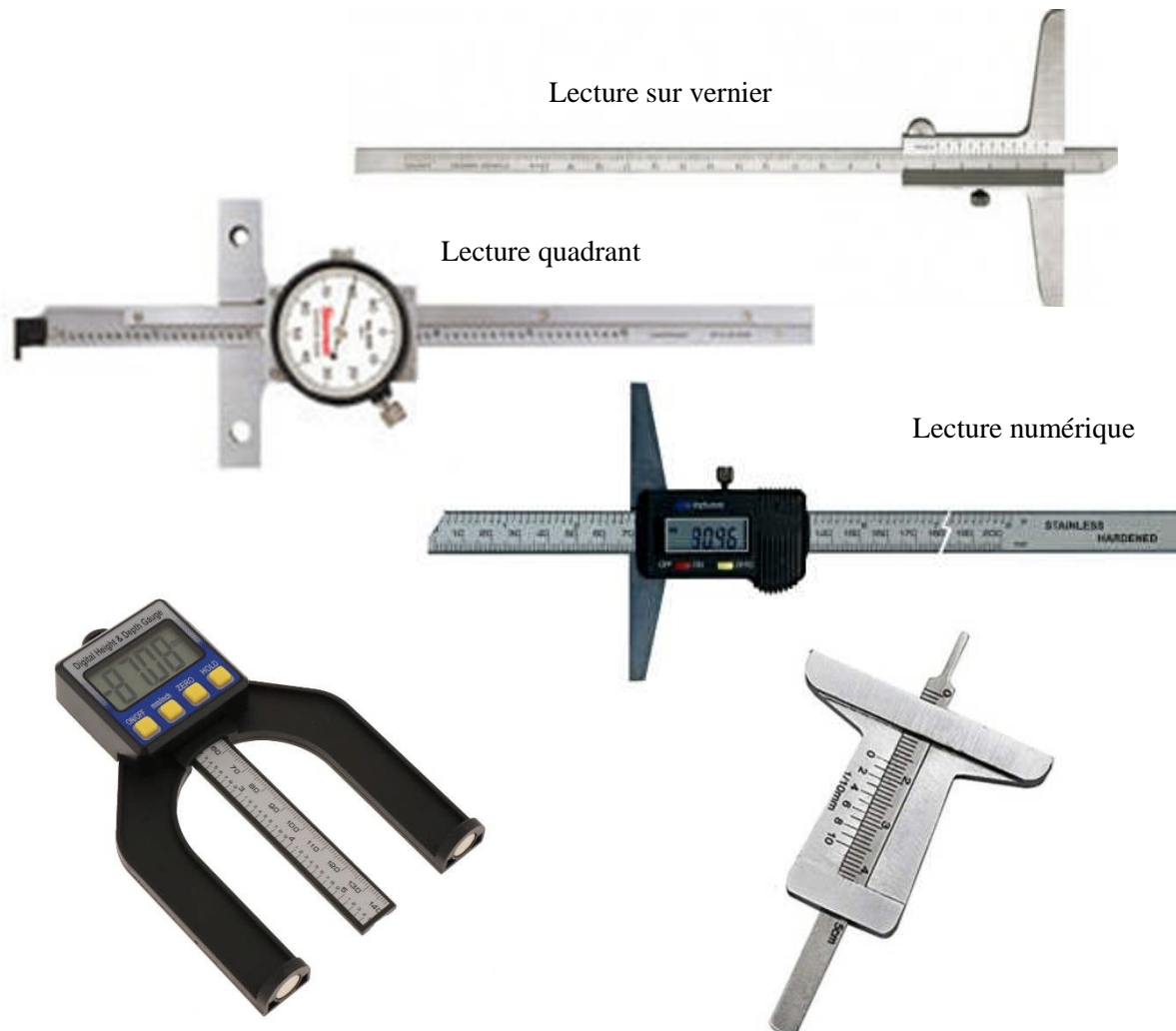


Fig.31 : Différents type de jauge de profondeurs

II.7.1.6. Le trusquin

On appelle trusquins les outils de traçage opérant par translation sur une surface d'appui de référence. Ils sont utilisés principalement en menuiserie, en ébénisterie et en fabrication mécanique. Il en existe de nombreuses formes, présentant des degrés de sophistication plus ou moins grands. Le trusquin Permet le tracé (le plus souvent par gravure) d'une ligne parallèle à une surface de référence par déplacement en appui sur cette surface qu'on appelle marbre. Cette surface peut être un côté de la pièce tracée (trusquin du menuisier) ou une surface de référence externe

(marbre) sur laquelle se positionne la pièce à tracer, directement, ou avec des accessoires de positionnement (vé).



Fig.32 : Illustration de différents modèles de trusquins.

II.7.1.7. Le micromètre ou le palmer

Souvent utilisés en mécanique pour mesurer des diamètres d'éléments cylindriques ou des épaisseurs. Les micromètres mesurent toutes dimensions linéaires en deux points. Ils sont composés d'une touche fixe et d'une touche mobile à vis micrométrique. Excellente précision, Lecture par vernier, parfois complété d'un compteur. Le limiteur de couple ou rochet, intégré sur certains, permet un serrage identique pour chaque mesure. Régulation de la force du micromètre extérieur obtenue par cliquet. Au-delà de 25mm, certains sont munis d'un étalon.



Fig.33 : Micromètres (ou Palmer) analogiques extérieur STEINMEYER.

Il existe différents type de micromètres pour mesure extérieur et intérieur en fonction de la cote à mesurer. Le gabarit est choisi en fonction de la grandeur de la pièce à mesurer (0 à 25mm, 25 à 50mm, 50 à 75...etc.). Il permet l'évaluation des mesures avec une précision de 1/100 mm, il est constitué en acier dur, seulement les touches sont trempées.

Le pas de la vis micrométrique est égale à 0.5 mm ($p=0.5$ mm) et le nombre de division du tambour est égale à 50 ($N=50$ divisions) donc une division du tambour, correspond à un déplacement de la touche mobile de 0.01 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.

a) différents organes d'un micromètre

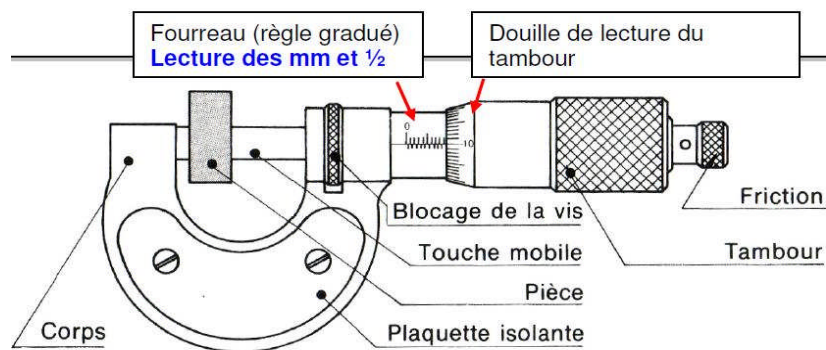


Fig.34 : Principaux organes du palmer.

- 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 $1/2$ 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 $1/100^{\text{e}}$)
- Le bouton de friction qui permet de manœuvrer le micromètre sans le détériorer.
- Le système d'étalonnage (vis de réglage).

b) Principe de la lecture

Tout d'abord pour un micromètre on doit vérifier l'étalonnage à l'aide de la jauge prévu à cet effet, avant chaque utilisation (figure35). il faut que la lecture correspond à la valeur de l'étalon.



Fig.35 : Etalonnage d'un micromètre.

La méthode de mesure avec un micromètre consiste à insérer l'étalon ou l'objet à mesurer entre les mâchoires du micromètre, pincer la pièce avec les touches à l'aide de la vis de friction et on fait le serrage de la pièce à l'aide de la molette limiteur d'effort. Lire le nombre entier de mm et de 1/2 mm sur la génératrice de repérage (dernière graduation découverte par le tambour). Puis on lit la fraction de millimètre (X) sur le tambour gradué en 0,01.

1ère étape : La lecture des mm s'effectue sur le fourreau, la limite côté gauche du tambour gradué est proche de l'échelle des mm

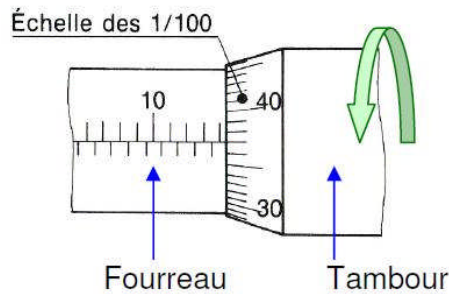


Fig.36 : Démonstration d'une lecture du micromètre.

2ème étape : la lecture des 1/100 de mm (0.01mm) 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. La lecture sur le tambour graduée est : $0,37 + 14 + 0,37 = 14,37$ mm.

Exemple de lecture

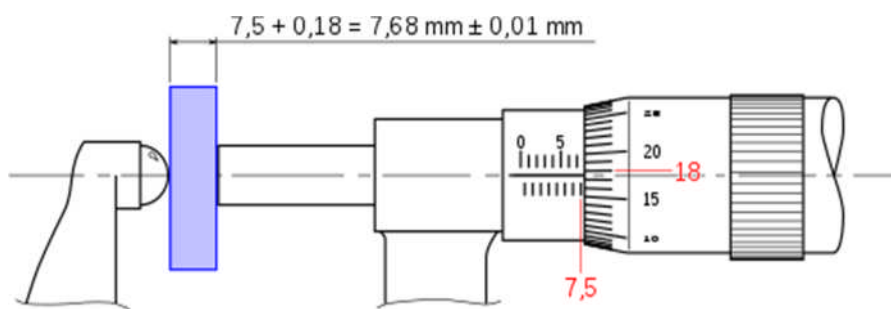


Fig.37 : Exemple de lecture d'une mesure par un micromètre.

c) Différents modèles de micromètre

Comme pour tous les outils de mesure à longueur variable déjà cité il existe aussi des micromètres à cadrans et lecture digitale pour mesure extérieur et intérieur. Le mode de lecture est le même que pour le micromètre d'extérieur. Concernant le cas du micromètre à trois touches le tambour commande la sortie des trois touches à 120° et permet la mesure des alésages.



Fig.38 : Micromètre à cadran et digitale pour mesure extérieur.



Fig.39 : Micromètre d'intérieur à becs et trois touches.

II.7.1.8. Mesure d'angles

La traçabilité métrologique des mesures de longueurs est basée sur l'utilisation de sources laser particulières dont on connaît la longueur d'onde. Il est alors possible de démontrer le rattachement des mesures à l'unité de longueur en respectant strictement la définition du mètre.

Dans le cas des mesures d'angle, la référence est le tour, définition purement géométrique de même que la définition de l'unité d'angle plan : « Le radian (rad) est l'angle plan compris entre deux rayons qui interceptent, sur la circonférence d'un cercle, un arc de longueur égale à celle du rayon ».

La nature abstraite de l'unité d'angle, basée uniquement sur des considérations géométriques, lui confère une propriété importante pour tous les utilisateurs : l'accessibilité. On pourrait donc considérer qu'il n'est pas nécessaire d'instituer une chaîne d'étalonnage permettant de lier toute mesure d'angle à la définition de la grandeur ou à une matérialisation de cette définition comme pour le mètre.

Mais la possibilité de réaliser des mesures angulaires avec un certain niveau d'exactitude requiert une instrumentation et une mise en œuvre qui ne sont pas aisément accessibles aux laboratoires d'étalonnage a fortiori dans un contexte industriel, d'où la réalisation d'étalons matérialisant des angles, soit sous forme discrète soit au travers d'instruments de mesure.

En conséquence, la métrologie des angles repose avant tout sur l'instrumentation et sur la capacité des moyens ou méthodes à diviser précisément le cercle, et non sur la possession d'un étalon primaire de référence. Une exception est faite dans le domaine des petits angles pour lesquels les techniques basées sur des mesures de longueurs sont parfois plus appropriées.

II.7.1.8.1. Unité de mesure des angles

Dans le plan, les unités de mesure d'angle sont : le **tour**, le **degré**, le **grade** et le **radian**.

a) Le tour : Dont l'unité est le tour ($1 \text{ tour} = 2\pi \text{ rad}$)

Le tour, dont l'abréviation est (**tr**) est le plus petit angle tel que la rotation de 1tr amène la figure dans la même situation qu'avant la rotation. Le secteur angulaire qu'il découpe est le plan complet. Des vitesses angulaires peuvent être exprimées en tr/min. Il est subdivisé en demi-tour (angle plat), quart de tour (angle droit), etc.

Angles remarquables

- Angle nul : 0 tr ;
- Angle droit : 1/4 tr ;
- Angle plat : 1/2 tr ;
- Angle plein : 1 tr.

b) Le degré : Dont l'unité est le degré ($360^\circ = 1 \text{ tr}$)

Le degré est l'unité de mesure d'angle la plus utilisée dans la vie courante. Il est subdivisé en minutes et secondes. $1^\circ = 60'$, $1' = 60''$ donc $1^\circ = 60 \times 60 = 3600''$

Ce système sexagésimal provient des Babyloniens et facilite les calculs car 60 est divisible par les nombres premiers 2, 3 et 5 et a donc un assez grand nombre de diviseurs. Les abréviations « ° », « ' » et « '' » sont les seules à ne pas être séparées du nombre par un espace.

Angles remarquables :

- Angle nul : 0° ;
- Angle droit : 90° ;
- Angle plat : 180° ;
- Angle plein : 360° .

c) Le grade : Dont l'unité est le **gon**

Appelé aussi gardian ou degré centésimal (pour le différencier du degré sexagésimal). Son abréviation est **gon**. Un angle droit est 100 gon, un tour 400 gon.

Le mètre est lié au grade : sa définition par rapport au méridien terrestre fait qu'il correspond à un angle de 10^{-5} gons au centre de la Terre.

L'inconvénient du grade est l'absence de multiple de 3, ce qui complique pour des angles comme 30° et 60° très utilisés en géométrie.

Angles remarquables :

- Angle nul : 0 gon ;
- Angle droit : 100 gon ;
- Angle plat: 200 gon;
- Angle plein : 400 gon.

d) Le radian : Dont l'abréviation est **rad**,

C'est l'unité dérivée du système international. Le cercle complet mesure $2\pi \text{ rad}$. Le radian est l'unité employée en mathématiques, la seule qui donne un sens aux calculs sur les fonctions trigonométriques (série de Taylor, formule d'Euler notamment).

En fait le nom radian date de 1870 (dû au mathématicien écossais Thomas Muir), Euler, un siècle plus tôt, avait établi sa formule en spécifiant que les angles devaient être mesurés par la longueur en rayons de l'arc qu'ils interceptent.

Angles remarquables

- Angle nul : 0 rad ; - Angle droit : $\pi/2$ rad ;
- Angle plat : π rad ; - Angle plein : 2π rad.

Tableau 4 : Conversion et correspondance entre les principales unités d'angle

Angles	Tours	Degrés	Radians	Grades
Angle nul	0 tr	0°	0 rad	0 gon
	1/12 tr	30°	$\pi/6$ rad	33,333... gon
	1/8 tr	45°	$\pi/4$ rad	50 gon
	1/6 tr	60°	$\pi/3$ rad	66,666... gon
Angle droit	1/4 tr	90°	$\pi/2$ rad	100 gon
	1/3 tr	120°	$2\pi/3$ rad	133,333... gon
Angle plat	1/2 tr	180°	π rad	200 gon
Angle plein	1 tr	360°	2π rad	400 gon

II.7.1.8.2. Instrument de mesure d'angles

Le rapporteur est un instrument de mesure conçu pour mesurer les angles lors de divers travaux de construction et de réparation. Il existe différents modèles en vente, il est possible de choisir l'appareil qui convient le mieux à un type de travail particulier.

On recense 5 principaux instruments de mesure d'angles : Le rapporteur, l'alidade, le goniomètre, le théodolite, le sextant.

➤ Le rapporteur d'angles :

L'instrument de mesure d'un angle couramment utilisé est un **rapporteur**, il a généralement la forme d'un demi cercle ou d'un cercle entier (Il est gradué en « degré » ou en « grade ») voir « demi – degré » ou « demi – grade ». Dans le premier cas, l'instrument dispose d'une échelle spéciale qui permet d'augmenter la précision des valeurs d'un ordre de grandeur. De tels outils à utiliser sont similaires à un pied à coulisse, en cours de fonctionnement ne pose généralement pas de difficultés. Dans ce cas, il sera facile de lire les lectures. Les degrés sont affichés sur l'échelle principale.

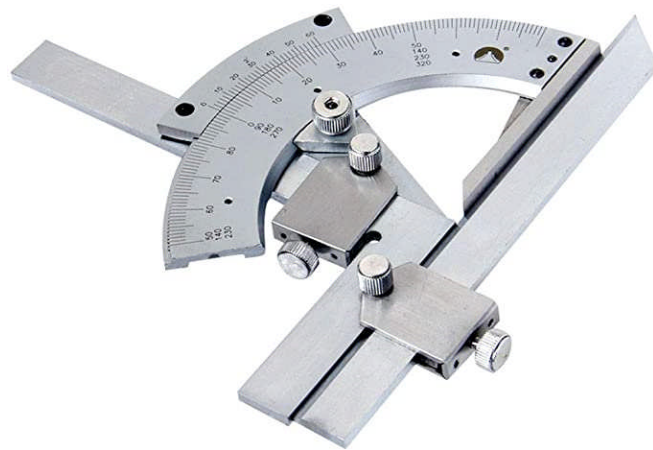


Fig.40 : Rapporteur d'angle à vernier.

➤ **Principe de lecture du rapporteur d'angles universels**

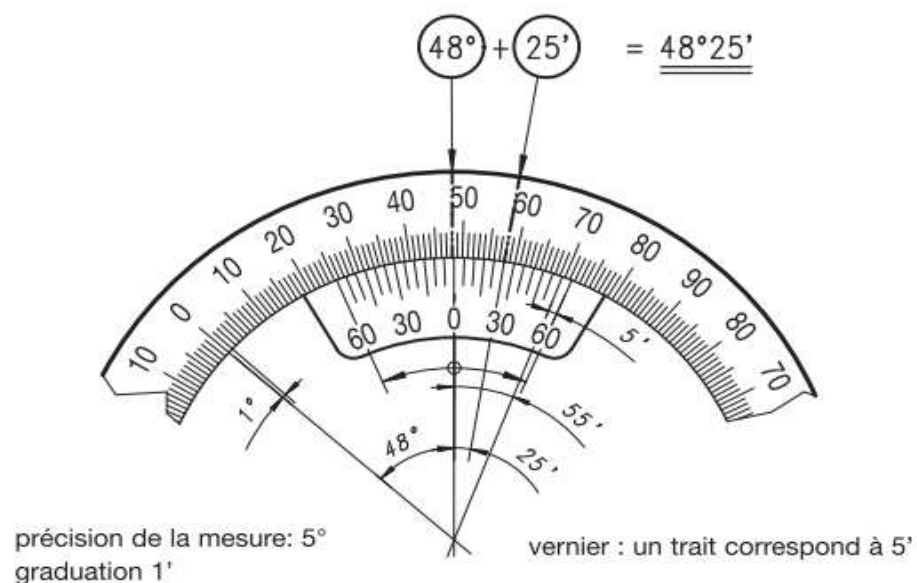
Le rapporteur d'angle universel est un instrument de mesure des angles extérieurs. Il est constitué de deux règles en acier inoxydable qui prennent appui sur les côtés matérialisant l'angle. Ces règles sont assemblées à un disque sur lequel est imprimée une échelle de degrés. Pour augmenter la résolution, on se sert d'un vernier associé au disque gradué.

➤ **Les règles de lecture des rapporteurs d'angle universels**

- On relève en premier les degrés entiers sur la graduation principale à partir de 0° jusqu'au trait zéro du vernier.
- Ensuite, on lit dans la même direction de lecture les minutes sur le vernier.

Exemple de lecture des angles

Exemple (a) : Lecture du vernier



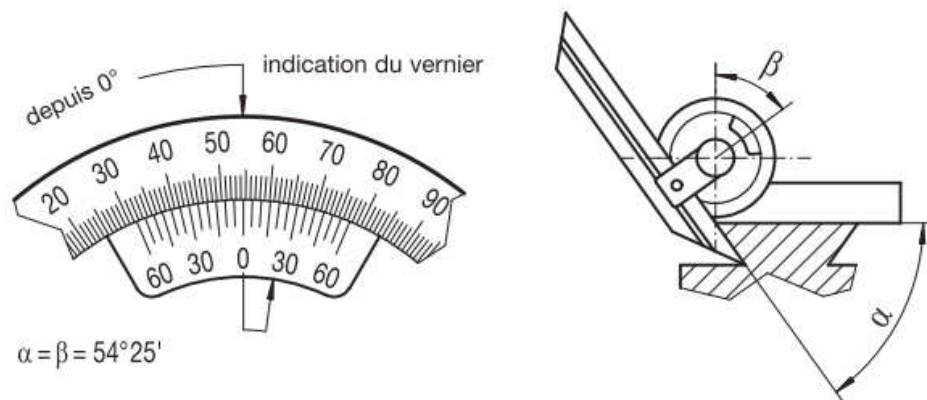
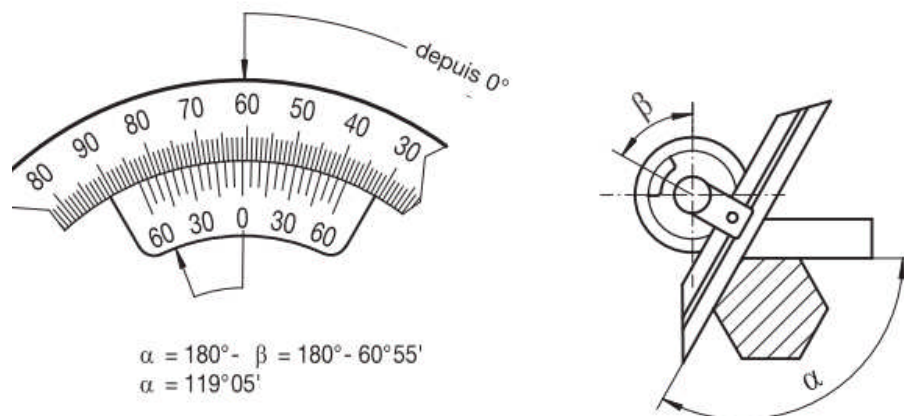
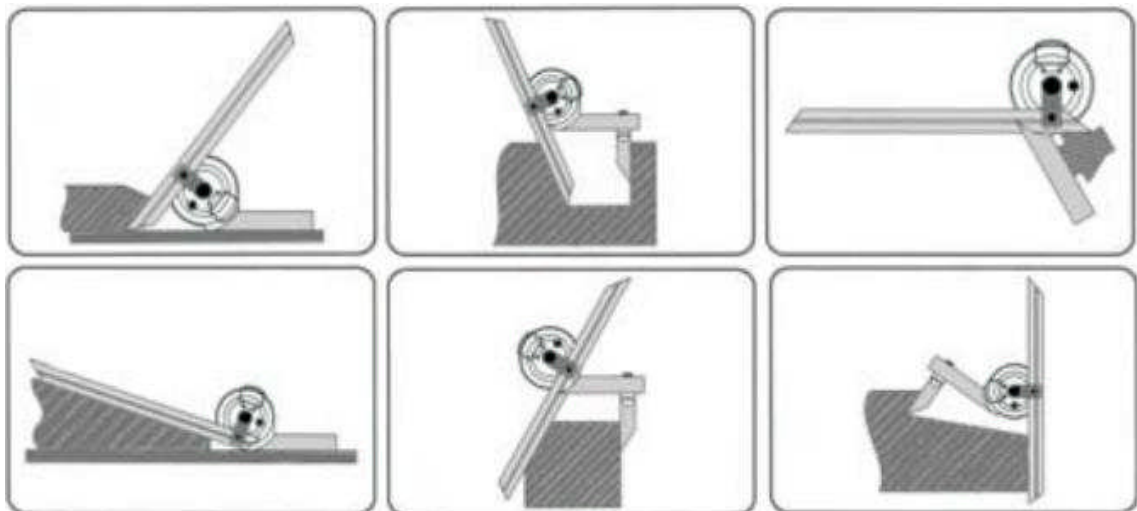
Exemple (b) : Angle aigu (entre 0° et 90°)**Exemple (c) : Angle obtus****Exemple (d) : Methode de positionnement de du rapporteur d'angle avec les accessoires.**

Fig.41 (a,b,c,d) : 4 Exemples de lecture d'angles.

➤ **Differents type de rapporteur d'angles**

Comme pour tous les outils de mesure à longueur variable déjà cité il existe aussi des rapporteurs d'angles à cadrans et lecture digitale



. Fig.42 : Rapporteur d'angle à cadrant



Fig.43: Rapporteur d'angle numérique

II.7.1.8.3. Instrument de mesure d'angles en topographie

- **L'alidade** : Une alidade est un instrument permettant la mesure d'angle. Elle est constituée d'un disque plan, dont le pourtour est gradué (en degrés généralement) et d'un viseur, mobile en rotation autour de l'axe vertical du disque.

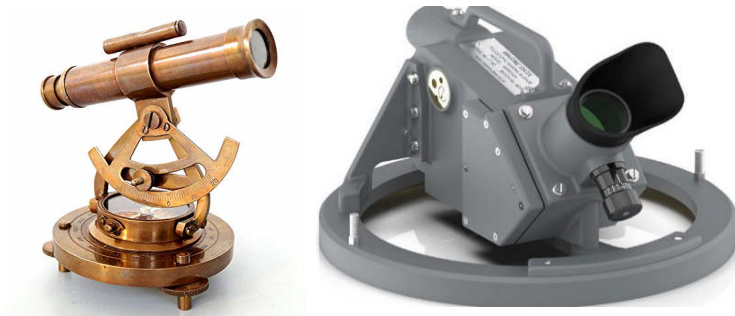


Fig.44 : Télescope alidade ancien et nouveau.

- **Le goniomètre** : Les goniomètres sont des instruments de haute précision permettant de mesurer des angles de prismes par réflexion. Les goniomètres de Möller-Wedel Optical sont équipés d'un collimateur supplémentaire pour effectuer une mesure en transmission. En ajoutant une source lumineuse, le goniomètre peut être transformé en Spectro-goniomètre. Avec cette option, vous pourrez mesurer des indices de réfraction de verre optique, de cristaux et de liquides.

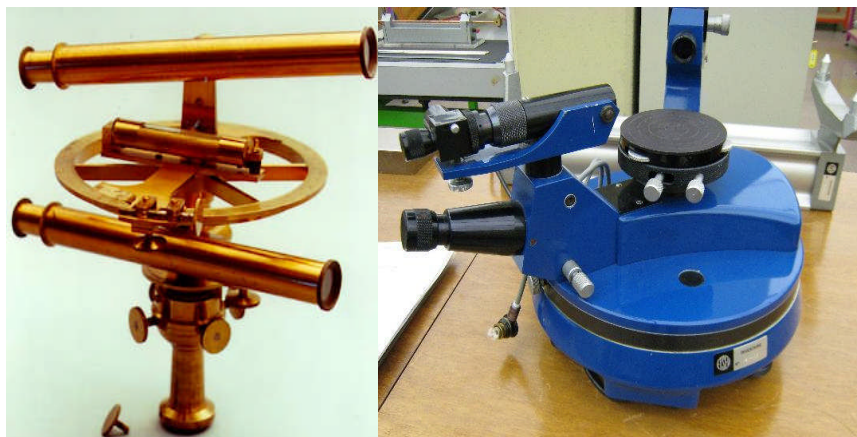


Fig.45 : Goniomètre à prisme ancien et nouveau.

- **Le théodolite** : Un théodolite est un appareil permettant de mesurer des angles horizontaux (angles projetés dans un plan horizontal) et des angles verticaux (angles projetés dans un plan vertical). Le terme théodolite regroupe l'ensemble des appareils à lecture «mécanique» par vernier gradué en comparaison aux appareils «électroniques», dont la lecture se fait sur un écran à affichage numérique. La mécanique de base des théodolites électroniques est souvent la même que celle des théodolites classiques.

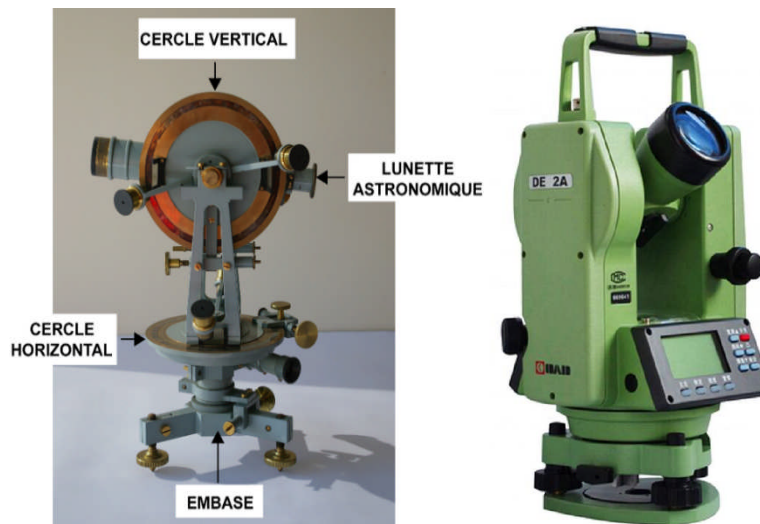


Fig.46: Le théodolite ancien et nouveau de haute précision

- **le sextant** : Un **sextant** est un instrument de navigation à réflexion servant à mesurer la distance angulaire entre deux points aussi bien verticalement que horizontalement. Il mesure l'angle entre l'horizon et un objet lointain (clocher, montagne, etc.) ou un astre (Soleil, Lune ou étoile).



Fig.47 : Le sextant ancien et nouveau.

II.7.2. Contrôle par mesure 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 ...)

II.7.2.1. Mesure par comparaison (Le comparateur)

Ce sont des instruments de comparaison entre deux grandeurs de faible différence. Les déplacements du palpeur d'un comparateur sont transmis par un système de pignon crémaillère à une aiguille se déplaçant devant un cadran circulaire gradué.

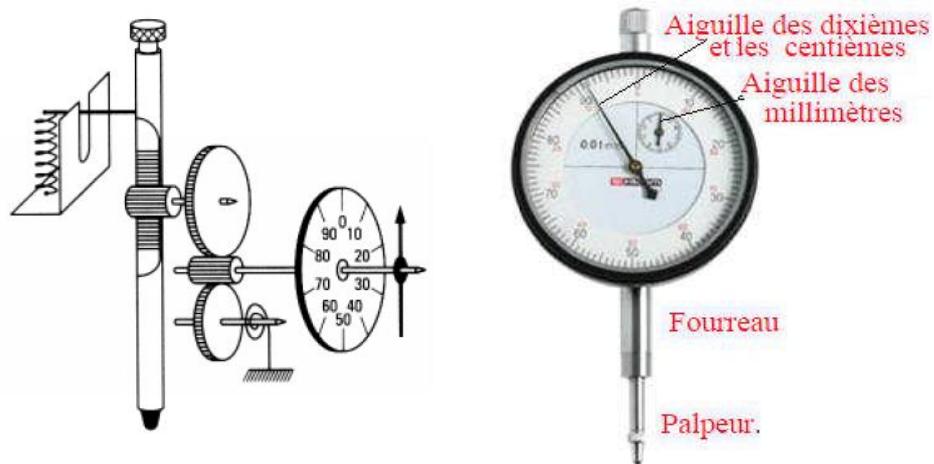


Fig.48 : Chaîne cinématique du comparateur à cadran.

Les comparateurs ou amplificateurs 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. Un comparateur est caractérisé par :

- Son étendue de mesure, généralement faible 3.5 ou 10 mm ;
- Sa résolution, couramment 0.01 ou 0.001 mm ;
- La forme du palpeur, sa touche est changeable en vue d'adapter la forme convenable à la pièce envisagée ;
- L'effort de mesurage est de l'ordre de 1.5 N.

II.7.2.1.1. Principe de fonctionnement

Pour un déplacement de 1 mm du palpeur lié à la crémaillère, l'aiguille liée au pignon terminal de la chaîne cinématique fait 1 tour. Le cadran étant divisé en 100 graduations, chaque graduation est égale 1 mm/100, soit 0,01 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^e de mm.

II.7.2.1.2. Principales utilisations

- Réaliser les différents réglages géométriques sur la machine ;
- Mesurer l'écart entre un étalon et une pièce à mesurer.

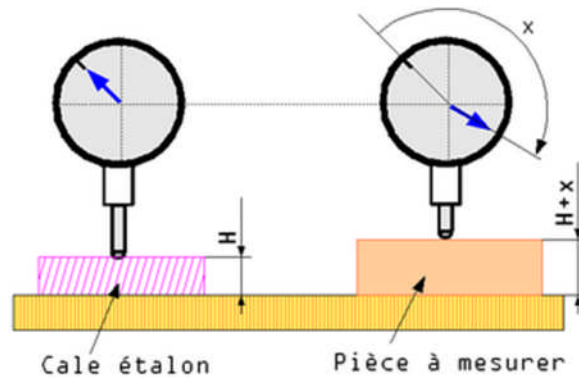


Fig.49 : Principe de comparaison d'une cote avec étalon.

- **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.

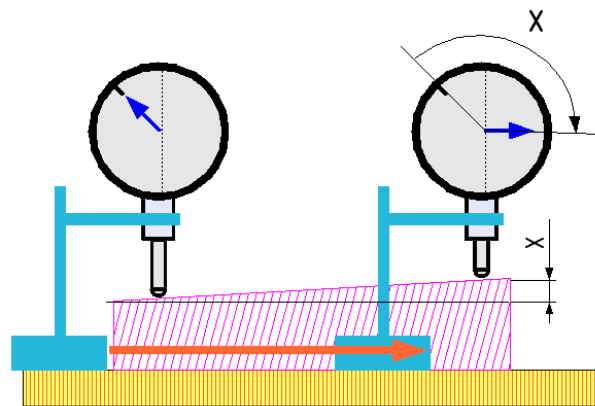


Fig.50 : Principe de mesure d'un écart de rectitude avec un comparateur.

II.7.2.1.3. Conditions normales d'utilisation

- a. Vérifier, avant usage, la fidélité de réponse (retour à la même graduation).
- b. Vérifier le vissage du palpeur.
- c. Réduire les porte-à-faux lors du montage du comparateur sur le support (ci-contre).

II.7.2.1.4 Types de comparateurs

On trouve différents modèles de comparateurs selon la lecture et selon la forme à contrôler. On distingue les comparateurs à cadran à tige rentrante radiale (a), à levier numérique tige rentrante radiale (b), à levier mécanique (c), à palpeur intérieur (d), Jauge d'épaisseur (e)



. Fig.51 : Démonstration de modèles de comparateurs.

II.7.2.2. Mesure par calibrage (Instruments de mesure à dimensions fixes)

Pour assurer l'interchangeabilité des pièces, on les cote souvent à l'aide d'ajustement fixant ainsi une cote mini et une maxi. Pour vérifier ces pièces en cours de fabrication ou à la réception, on utilise souvent des calibres à limites.

Ils permettent de vérifier directement que les dimensions mesurées sont situées dans la marge de tolérance fixée par les spécifications géométrique.

On distingue deux familles de calibres :

- Les calibres à limite standard qui sont généralement normalisés, Ils peuvent être lisses ou filetés (tampons, bagues.....).
- Les calibres spéciaux non standards, fabriqués à la demande.

Les moyens de contrôle aux limites sont simples à utiliser, pas chers mais ne renseignent pas sur la valeur de la cote et ne détecte pas certains défauts de forme. Pour ce qui est d'étalonnage et vérification, ces moyens se contrôlent à l'aide des calibres rapporteurs sur un banc de mesure et selon une procédure déterminée par la norme.

Les moyens de contrôle en cours de fabrication pour les angles sont limités. On trouve les angles étalons pour les angles extérieurs (équerre, étalon 45°, 60°, 120°, 135°,...) et seulement le calibre tampon pour les angles intérieurs.

Le contrôle se fait par simple pénétration du cône qui doit être enduit de poudre ou de teinte, pour contrôler les défauts géométriques intérieurs car la teinte en contact avec les milieux défectueux, ne sera pas abîmée.

Ces contrôles rapides demeurent cependant très utiles lorsque des tolérances utilisent le principe du maximum de matière. Habituellement, un calibre à limites est conçu de façon spécifique ; il ne convient donc que pour une dimension nominale et une étendue de tolérance donnée. Une production variée nécessite alors d'avoir recours à stocker un grand nombre de calibres, chacun étant spécifique, cependant les calibres à limites ne sont pas des appareils mesureurs.

II.7.2.2.1. Calibres à limites pour alésages (Tampon lisse)

Le tampon est un vérificateur constitué par un ou deux cylindres en acier trempé à surface parfaitement lisse, montés sur les extrémités d'une poigner sur laquelle est marquée la cote nominale suivie des symboles de tolérance.

Le contrôle d'une cote intérieure exige :

- Un vérificateur (mini) entre pour affirmer que la cote n'est pas trop faible ; c'est le
- Un vérificateur (maxi) n'entre pas pour affirmer que la cote n'est pas trop grande ;

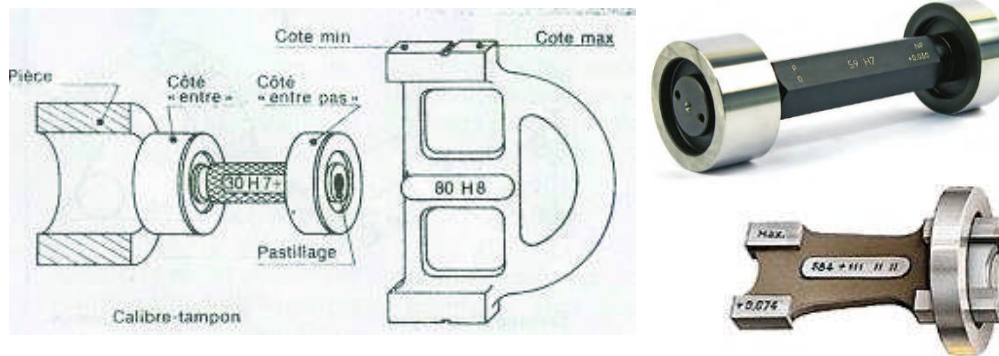


Fig.52 : Calibres à limites pour alésages.

Si les deux conditions sont remplies, la pièce est acceptable. La pièce a donc bien une cote réelle comprise entre les cotes limites

II.7.2.2.2. Calibres à limites pour arbre (bague lisse et calibres mâchoires)

- **Bague lisse** : cylindrique de $3 \text{ mm} \leq D \leq 150 \text{ mm}$, mesure sur 2 ou 3 diamètres - Par comparaison mécanique.



Fig.53 : Bague lisse pour contrôle des arbres.

- **Calibre à mâchoire** : Chaque vérificateur est constitué par deux mâchoires gravés en son milieu la cote nominale. et les symboles de tolérance sont gravés au milieu du poignet. Pour l'emploi de ces vérificateurs, observer les mêmes règles que pour l'emploi des tampons lisses.

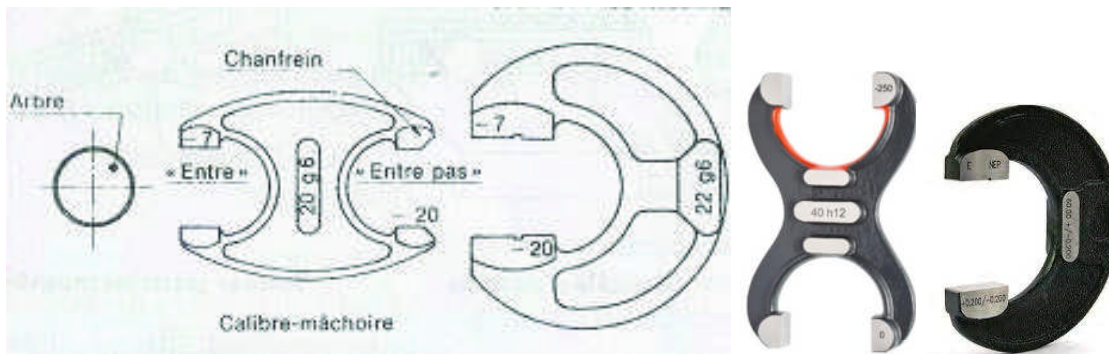


Fig.54 : Calibre à mâchoire

II.7.2.2.3. Calibres à limites pour filetage

- ✓ **Tampon fileté** : Tampon fileté cylindrique simple ou double, $\alpha = 55$ ou 60° , de $3 \text{ mm} \leq D \leq 100 \text{ mm}$, pas de 0,5 à 5 mm, mesure sur 1 diamètre.



Fig.55 : Tompon fileté.

- ✓ **Bague filetée** : Bague filetée cylindrique, $\alpha = 55^\circ$ ou 60° , de $4 \text{ mm} \leq D \leq 125 \text{ mm}$, pas de 0,5 à 6 mm, mesure sur 1 diamètre - Par comparaison mécanique.

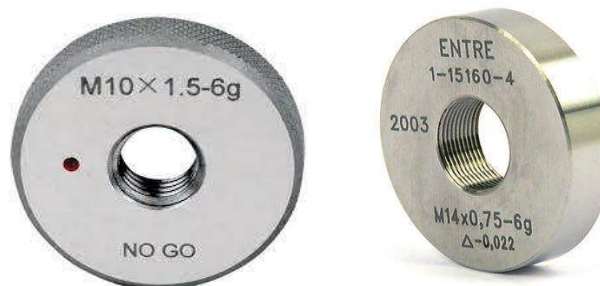


Fig.56 : Bague filetée.

II.7.2.2.4. Bague Pour contrôle d'angles

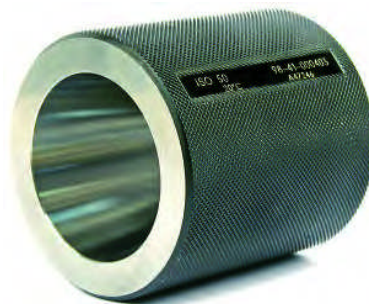


Fig.57 : Bague pour contrôle des portées coniques.

- ✓ **Calibres** : Bague-calibre conique pour contrôler les petites portées coniques.
- ✓ **Cône-calibre** : pour contrôles d'angles intérieurs



Fig.58 : Calibre pour cône.

- ✓ **Equerres** : Les équerres servent au traçage et à la vérification des pièces. Les types les plus employés pour ce genre de travaux sont l'équerre à chapeau, l'équerre simple combinée et équerre double onglet

➤ **Equerre à angle aigu** :

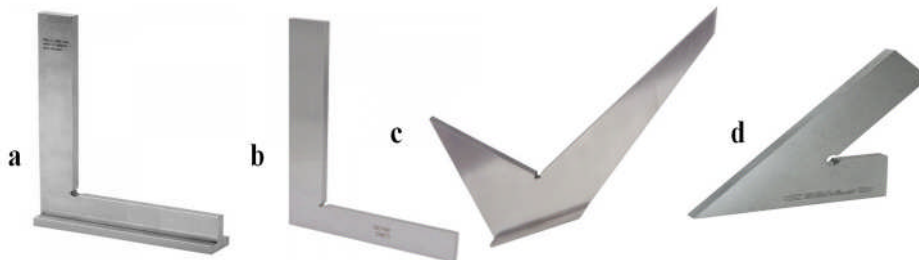


Fig.59 : Equerre à angle aigu

a : Equerre à chapeau d'atelier à 90°, **b** : simple d'atelier, **c** : Equerre double onglet, **d** : à angle 45°, 60°

- **Barre sinus** : La barre sinus consiste à réaliser des plans inclinés à l'aide de différentes hauteurs de cale. Ce procédé évite d'incliner la tête de la fraiseuse ou d'incliner l'étau. Il est plus simple à utiliser et plus précis. elle est utilisée dans le cas d'usinage ayant un faible intervalle de tolérance, et des cotes géométriques précises.



Fig.60 : Barre sinus.



Fig.61 : Plateau magnétique en table sinus.

La **barre sinus** a la particularité d'avoir un intervalle de 100mm entre ses deux cylindres. Dans quelques cas on préfère contrôler une horizontalité ou un parallélisme et calculer ensuite les angles. Elle est composée d'un corps qui permet de maintenir deux pignes à une distance fixe et précise.

Exemple d'application figure 50 : Pour modifier l'inclinaison de l'usinage, il suffit de faire varier la hauteur de cale (h)

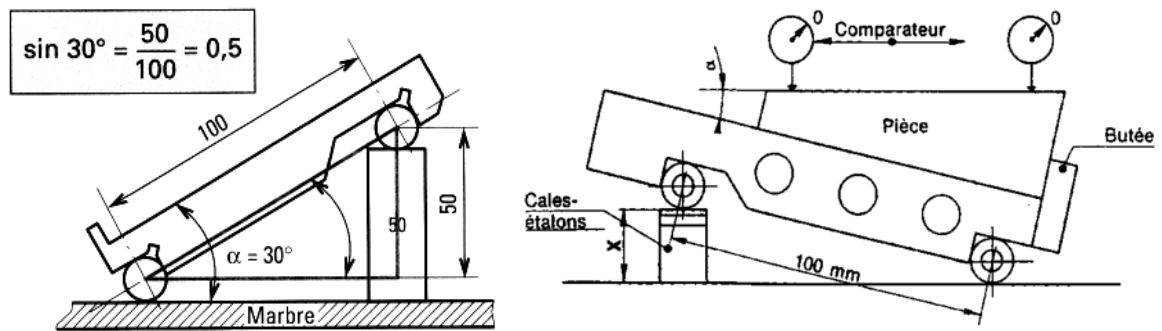


Fig.62 : Exemple d'application de la barre de sinus.

Nous pouvons donc constater qu'avec une barre sinus, il existe une relation entre la hauteur de cale et l'angle d'usinage.

II.8. Contrôle de défauts géométrique

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 pallier 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 et la circularité. Tandis que les défauts de position concernent une relation entre deux éléments géométriques de la pièce tel que 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.

II.8.1. Tolérances de forme

La tolérance de forme est une tolérance géométrique de base permettant de déterminer la forme de la cible (pièce). Aucune des caractéristiques de la tolérance de forme ne requiert de référence spécifiée. Les formes peuvent être déterminées indépendamment. Le tableau suivant illustre des exemples d'application d'une tolérance de forme dans un dessin technique et son interprétation.

Tableau.5 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances de forme.

Symbole	Exemple	Interprétation	Observations
rectitude —			La ligne sommets doit rester entre deux droites parallèles (du dessin) distantes de 0,1, parallèles ou non aux autres parties de l'objet.
			Chaque génératrice du cylindre doit rester entre deux droites parallèles distantes de 0,05, parallèles ou non à l'axe.
			L'axe du cylindre doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,2, coaxiale ou non à l'axe de la pièce
planéité 			La surface de la pièce doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,2, parallèles ou non aux autres parties de l'objet.
circularité 			Le profil de chaque section perpendiculaire à l'axe doit rester entre deux cercles concentriques distants de 0,1, centrés ou non sur l'axe du cylindre.
cylindricité 			La périphérie du cylindre doit être contenue entre deux cylindres coaxiaux distants de 0,1 (englobe la rectitude et la circularité).
profil d'une ligne 			Le profil de chaque ligne doit rester entre deux lignes qui enveloppent des cercles de diamètre 0,2 centrés sur le profil théorique spécifié.
profil d'une surface 			La surface de l'objet doit rester entre deux surfaces qui enveloppent des sphères de diamètre 0,4 centrées sur la surface théorique spécifiée.

II.8.2. Tolérances d'orientation

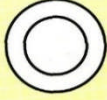
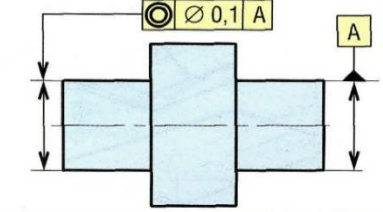
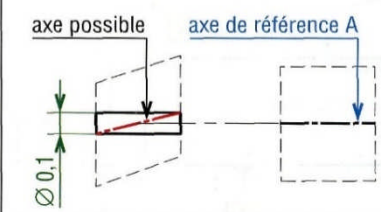
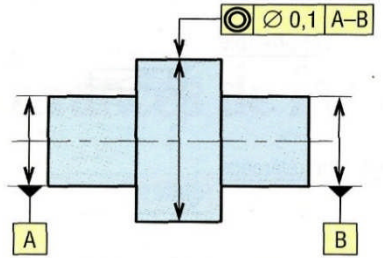
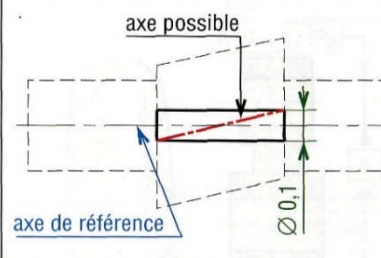
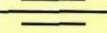
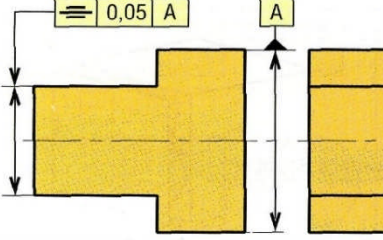
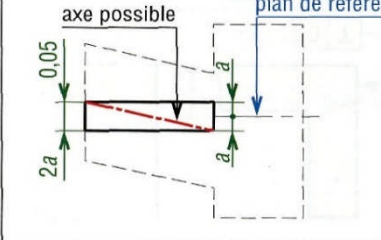
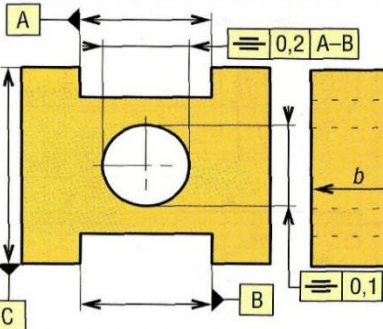
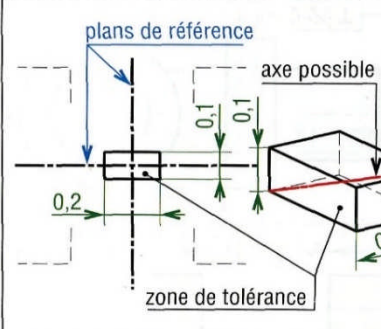
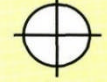
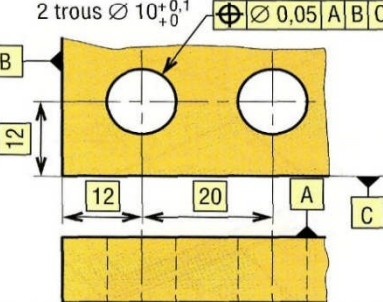
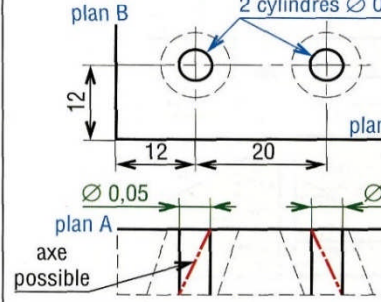
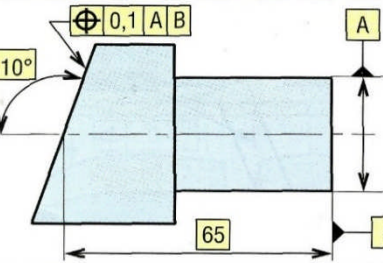
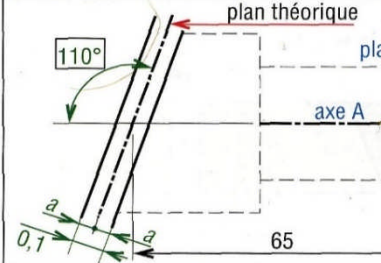
La tolérance d'orientation est une tolérance géométrique qui détermine l'orientation de la forme par rapport à une référence. Le parallélisme, la perpendicularité et l'inclinaison de deux lignes ou de deux plans sont mesurés à l'aide d'un plan de référence.

Tableau.6 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances d'orientation

Symbole	Exemple	Interprétation	Observations
paral- lélisme //			<p>La surface supérieure doit rester entre deux plans distants de 0,1 et parallèles au plan de référence A. Remarque : peut s'appliquer à une ligne ou un axe.</p>
			<p>L'axe du trou supérieur doit être contenu dans un cylindre de diamètre 0,2 d'axe parallèle à l'axe de référence A.</p>
perpen- dicularité ⊥			<p>La surface latérale gauche doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,15 et perpendiculaires au plan de référence A. Remarque : la référence peut être une droite ou un axe.</p>
			<p>L'axe du cylindre à gauche doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,5 d'axe perpendiculaire à A.</p>
			<p>L'axe du cylindre doit être contenu dans une zone parallélépipédique (1 x 2) perpendiculaire au plan A (a x b).</p>
incli- naison ∠			<p>La surface doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,3 et inclinées de 30° par rapport au plan de référence A. Remarque : la référence peut être une droite ou un axe.</p>
			<p>L'axe du trou doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 inclinée de 70° par rapport au plan A.</p>

II.8.3. Tolérances de position

Tableau.7 : Exemples d'indications et interprétations correspondantes aux tolérances de position.

Symbole	Exemple	Interprétation	Observations
concentricité et coaxialité 			L'axe du cylindre à gauche doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 dont l'axe est celui du cylindre droit (A).
			L'axe du cylindre au milieu doit être contenu dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 dont l'axe est celui des deux autres cylindres.
symétrie 			Le plan médian de la partie gauche doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,05 et disposés symétriquement par rapport au plan A médian de la partie droite.
			L'axe du trou doit être contenu dans un parallépipède 0,2 x 0,1 d'épaisseur b, d'axe l'intersection des plans médians (A-B) et (C).
localisation 			Les axes des trous doivent être contenus dans des cylindres de diamètre 0,05 d'axes perpendiculaires à A et positionnés par les cotes encadrées.
			La surface doit rester entre deux plans parallèles distants de 0,1, inclinés de 110° par rapport à A symétriquement par rapport au plan théorique (à 65 de B).

La tolérance de position détermine l'emplacent (position vraie) de l'élément par rapport à une référence. La tolérance de position requiert toujours une référence spécifiée. De ce fait, les éléments de cette tolérance géométrique sont dits associés.

II.8.4. Tolérances de battement

La **tolérance de battement** spécifie la variation de **battement** d'un élément lorsque la cible (pièce) est mise en rotation autour d'un axe (droite spécifiée). De ce fait, les éléments de cette **tolérance** géométrique sont dits associés.

Tableau.8 : Indications et interprétations correspondantes aux tolérances de battement

Symbole	Exemple	Interprétation	Observations
battement circulaire	<p>radial</p>		<p>Le battement radial pour chaque plan de mesure ne doit pas dépasser 0,05 pendant une rotation de la pièce autour de A ou ligne extraite entre 2 cercles coplanaires concentrique à A et distants de 0,05.</p>
	<p>axial</p>		<p>En tout point de la face, le battement axial (parallèle à A) ne doit pas dépasser 0,1 pendant une rotation complète autour de A ou ligne extraite entre 2 cercles identiques d'axe A distants de 0,1.</p>
	<p>oblique</p>		<p>Le battement oblique pour chaque cône de mesure ne doit pas dépasser 0,2 pendant une rotation complète de la pièce autour de A ou entre 2 cercles distants de 0,2 dans la section conique.</p>
battement total	<p>oblique</p>		<p>La surface mesurée doit rester entre deux cônes distants de 0,2 et d'angle 20 ° pendant une rotation complète de la pièce autour de A.</p>
	axial et radial	généralisation des cas précédents	

a) Battement circulaire

Plusieurs mesures sont nécessaires pour contrôler toute la surface spécifiée et la tolérance doit être respectée pour chaque position de mesure. La variation est mesurée dans la direction indiquée par la flèche. Au cours du mesurage, pendant une rotation complète autour de l'axe de référence, il n'y a pas déplacement de l'instrument de mesure ni déplacement axial de la pièce. Une erreur de battement simple peut résulter par exemple de défauts de circularité, planéité, cylindricité, perpendicularité (pris séparément ou en combinaison).

b) Battement total

Au cours du mesurage, l'instrument de mesure se déplace le long d'une ligne fixe spécifiée pendant que la pièce effectue une série de rotations autour de l'axe de référence. Les erreurs de battement total résultent, séparément ou en combinaison, de tous les défauts géométriques précédents.

II.9. Contrôle des défauts 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

Si :

$L/H = 50$ à 1000 on a une ondulation

$L/H < 50$ on a une rugosité

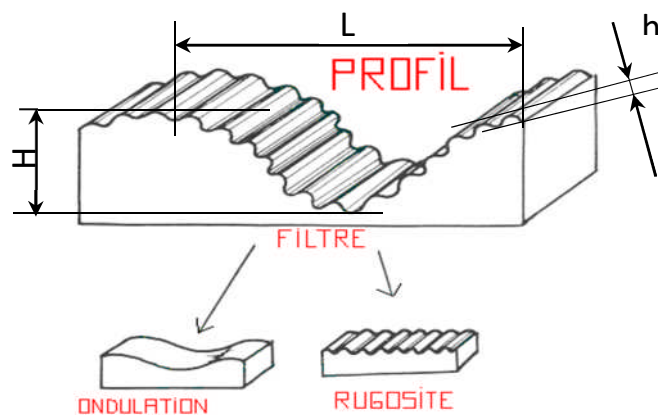


Fig.63 : Représentation de l'ondulation et de la rugosité d'une surface.

La rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surface de très petites amplitudes ou défauts micro géométriques (Figure 63).

II.9.1. Indication de la rugosité

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

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx = \frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{n}$$

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 du critère de la rugosité retenu choisi comme limite admissible.

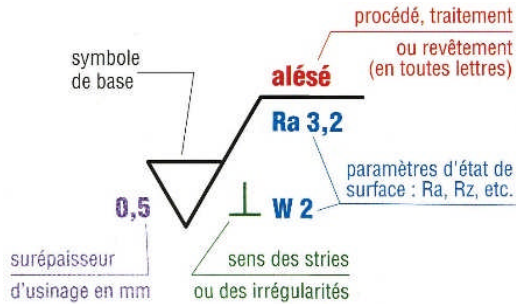


Fig.64 : Symbolisation des critères de la rugosité

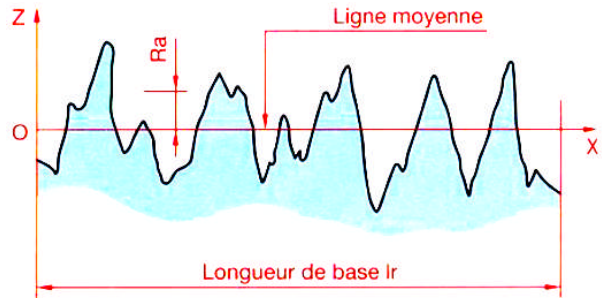


Fig.65 : Caractéristiques d'un état de surface

II.9.2. Instruments de mesure de la rugosité (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

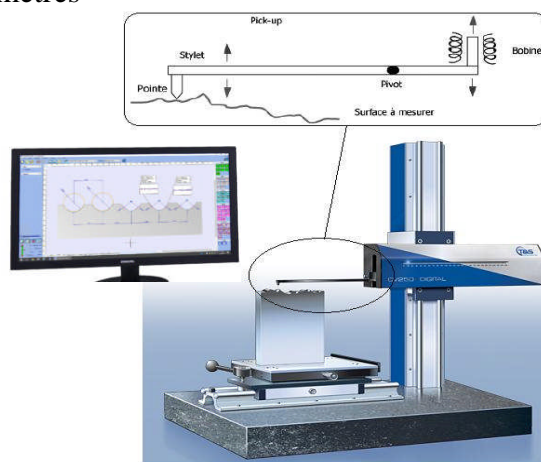


Fig.66 : Profilomètres - Mesure de profils.

II.10. Machines à mesurer tridimensionnelles

Les moyens de mesure classiques sont aujourd'hui complétés par les techniques de mesure tridimensionnelles qui permettent d'accéder à la géométrie des pièces complexes avec une grande précision et une grande rapidité. 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.

II.10.1. Principe générale

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.



Fig.67 : Machines de mesure tridimensionnelles MMT.

II.10.2. 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.



Fig.68 : Machine de mesure structure portique.



Fig.69 : Machine de mesure structure

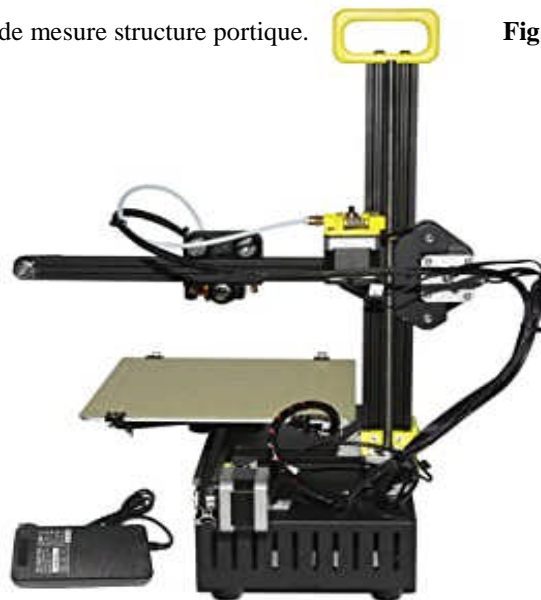


Fig.70 : Machine de mesure structure cantilever

II.10.3. Dispositif de palpé

Le palpeur est l'élément qui rentre en contact avec la pièce afin d'acquérir des points de mesure. On choisit sa dimension, sa forme et sa matière en fonction du travail de mesure que l'on doit réaliser.

Il existe deux types de têtes de palpé :

- **Les têtes de palpé 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 palpés statique** : Le palpeur actionne trois capteurs internes à la tête, qui délivrent en continue 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.



Fig.71 : Les têtes de palpation statique.



Fig.72 : Les têtes de palpation dynamique

Références bibliographiques

- [1]. Academie Poitiers,2013, Lycee professionnel Gaston Barré session. certificat d'aptitude professionnelle vendeur magasinier en pieces de rechange et equipement automobiles
https://ww2.ac-poitiers.fr/vehicules-materiels/IMG/pdf/5_cours_la_metrologie.pdf
- [2]. Techniques de l'Ingénieur. Mesures de longueurs et d'angles Ti673 - Mesures mécaniques et dimensionnelles Réf. Internet : 42408. • Accessibles sur
www.techniques-ingenieur.fr
- [3]. HEIG-Vd., 2010, Haute école d'ingénieur et de gestion du Canton de Vaud. Laboratoire de métrologie optique. Goniométrie Doc. PMO-TP-02 -.
- [4]. Heidenhan Johannes, 2015, GmbH. Systeme de palpage pour machine-outil.
www.heidenhain.de
- [5]. ANGLADE Bruce, HORSIN MOLINARO Hélène, 2017, Engrenages, conditions d'engrènement et procédés d'obtention. Ecole supérieur Paris Saclay.
- [6]. FANCHON J.-L., AFNOR Nathan. Guide des sciences de technologies industrielles.
- [7]. LENORMAND G., R. et all, Construction mécanique, tome 3.
- [8]. ESCUILLIE Marine, 2016, Vérification et étalonnage, que doit-on savoir ? Fascicule d'information du collège français de métrologie. Paris.
- [9]. FAVRE J.-L, 2000, Les différents types d'erreurs et leur prise en compte dans les calculs géotechniques, École centrale de Paris 92295 Châtenay-Malabry, Revue française de géotechnique N°93.
- [10]. Les Focus Techniques de L'ingénieur, 2020, Innovation et métrologie pour l'industrie.
www.techniques-ingenieur.fr
- [11]. GRESP Liban, 2010, Mesure et Incertitudes. Programmes de physique – chimie Académie, Nancy-Metz. Ressource pédagogique/&RH=1161013006328.
<http://www.pedagogie.ac-nantes.fr/64612998/0/fiche>
- [12]. ZAGO Lorenzo, 2011, Bases De Métrologie. Heig-Vd. Haute ecole d'ingenieur et de gestion du Canton de Vaud. École spécialisée de Suisse occidentale.

[13]. CHARPENTIER Alin, et all, 2019, Centre D'étude Et De Rénovation Pédagogique Et De L'enseignement Technique. Exploitation du concept GPS et de la normalisation pour la spécification géométrique des produits.

[14]. https://sti2d.ecolelamache.org/erreurs_absolue_relative.html

[15]- BARCHIESI Dominique, 2003, Mesure physique et instrumentation. Collection Technosup Ellipses ISBN 2-7298-1426-4.

[16]- JOHN R. Taylor, Coll. Masson, 2000, Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques. Sciences Dunod ISBN 2100043072.

[17]- Editions AFNOR. La métrologie en PME-PMI. Réseau des CTI (Centres Techniques Industriels). ISBN 2-12-460702-2