



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Tahar Moulay de Saida

Faculté de Technologie

Département de génie civil et hydraulique



Présenté par :

Dr. BENTAHAR Mohammed

Maître de conférences « B » en génie mécanique

Février 2021

Avant-propos

Le polycopié de «Métrologie » est un support pédagogique des cours théoriques en métrologie, il est destiné aux étudiants de 2^{ème} année Licence (LMD) de Génie civil, hydraulique et génie mécanique. Selon le programme du canevas proposé par la Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, assurées au département de génie civil et hydraulique.

Ce polycopié est conçu d'une manière à offrir aux étudiants d'assimiler et de comprendre les notions de base en métrologie.

Ce polycopié comprend quatre chapitres. Chacune d'elle est représentée par des plusieurs unités d'apprentissages.

Tout d'abord, il s'agit de trouver une idée générale sur la métrologie.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

جامعة الدكتور مولاي الطاهر سعيدة

Université D^r MOULY TAHAR DE SAIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

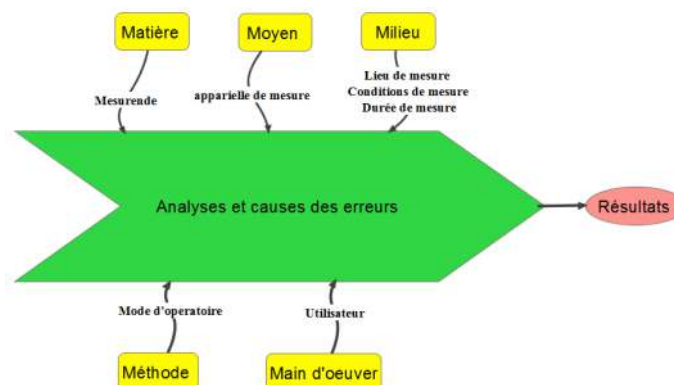
Département de génie civil et Hydraulique



Polycopie MÉTROLOGIE



Enseignant : D^r BENTAHAR Mohammed



Année universitaire 2020-2021

Table des matières

Introduction générale.....	8
1 Généralités sur la métrologie	10
1.1 Introduction.....	10
1.2 Les différents types de métrologie.....	10
1.2.1 Métrologie scientifique	10
1.2.2 Métrologie légale.....	11
1.2.3 Métrologie industrielle	12
1.3 Les vocabulaires métrologiques	12
1.3.1 Résultats obtenue.....	13
1.3.2 Opérations métrologiques.....	14
1.3.3 Equipements de mesure.....	14
1.4 Les institutions nationale et internationale de normalisation de métrologie	15
1.4.1 Abréviations des institutions nationale et internationale de métrologie.....	15
1.4.2 Dates et des événements en métrologique.....	16
2 Le système international de mesure SI	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Les grandeurs de base	19
2.2.1 Unité de longueur : le mètre (symbole : m).....	20
2.2.2 Unité de masse : le kilogramme (symbole : kg)	20
2.2.3 Unité de temps : la seconde (symbole : s)	20
2.2.4 Unité de courant électrique : l'ampère (symbole : A)	20
2.2.5 Unité de température thermodynamique : le kelvin (symbole : K)	21
2.2.6 Unité de quantité de matière : la mole (symbole : mol)	21
2.2.7 Unité d'intensité lumineuse : la candela (symbole : cd).....	21
2.3 Les unités dérivées	22
2.4 Unités supplémentaires	25
2.5 Règles d'écriture et d'utilisation des symboles d'unité SI	25
2.6 Multiples décimaux et sous-multiples d'unités SI.....	26
2.6.1 Préfixes SI	26
2.6.2 Règles d'utilisation des préfixes SI.....	26
3 Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure	29
3.1 Introduction.....	29
3.2 Erreur et incertitude (Justesse, précision, fidélité, répétitivité, reproductibilité d'un appareil de mesure.....	29

3.2.1	Précision	29
3.2.2	Justesse	30
3.2.3	Fidélité.....	30
3.2.4	Reproductibilité	30
3.2.5	Répétabilité.....	31
3.3	Classification des incertitudes de mesure	31
3.3.1	Les incertitudes de mesures.....	31
3.3.1.1	Erreur absolue, incertitude absolue	32
3.3.1.2	Erreur relative, incertitude relative.....	32
3.4	Classification des erreurs de mesure	32
3.4.1	Erreurs brutes	33
3.4.2	Erreurs systématiques.....	33
Figure 3.9. Erreur systématique[1].....	34	
3.4.2.1	Erreurs instrumentales.....	34
3.4.2.2	Erreurs environnementales	34
3.4.2.3	Erreurs d'observation.....	34
3.4.2.4	Erreurs théoriques.....	35
3.4.2.5	La valeur brut	35
3.4.2.6	La valeur corrigé.....	35
3.4.3	Erreurs aléatoires	35
3.5	Estimation des erreurs aléatoires	36
3.6	Erreur parasite.....	37
3.7	Erreurs fortuites	37
3.8	Erreurs systématique estimées	37
3.9	Intervalle de confiance	38
3.10	Incertitude technique.....	38
3.11	Incertitude de mesure totale	38
3.12	Résultat de mesurage complet.....	39
3.13	Identification et interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle	39
3.14	Notions de base sur les calibres les jauges et les instruments de mesure simples	40
4	Les instruments de mesure et de contrôle	42
4.1	Introduction.....	42
4.2	Mesure directe des longueurs et des angles.....	42
4.2.1	Règle.....	42
4.2.2	Pied à coulisse	43

4.2.2.1	Pied à coulisse à vernier	43
4.2.2.2	Pied à coulisse à montre	43
4.2.2.3	Pied à coulisse numérique ou électronique.....	44
4.2.2.4	Jauge de profondeur	44
4.2.2.5	Les composantes de pied à coulisse	45
4.2.2.6	Utilisation d'un pied à coulisse.....	45
4.2.2.7	Précision de mesure.....	46
4.2.2.8	Méthode de lecture	46
4.2.2.9	Exemples de mesure.....	47
4.2.2.10	Exercices.....	48
4.2.3	Micromètre	48
4.2.3.1	Micromètre à palmer	49
4.2.3.2	Micromètre numérique (digitale).....	49
4.2.3.3	Micromètres à cadran	49
4.2.3.4	Micromètres de profondeur	50
4.2.3.5	Les composantes du micromètre	50
4.2.3.6	Méthode d'utilisation	51
4.2.3.7	La précision des micromètres	52
4.2.3.8	Méthode de Lecture.....	52
4.2.3.9	Exemple de lecture	53
4.2.3.10	Exercice	54
4.2.4	Rapporteur d'angle.....	54
4.2.4.1	Les composants du rapporteur d'angle	54
4.2.4.2	Lecture du rapporteur d'angle.....	55
4.2.4.3	Exemple de mesure.....	55
4.2.4.4	Exercices	55
4.3	Mesure indirecte	55
4.3.1	Comparateur	56
4.3.2	Types de comparateur.....	56
4.3.2.1	Comparateur à cadran.....	56
4.3.2.2	Comparateur digitale	57
4.3.3	Composantes d'un comparateur.....	57
4.3.4	Méthode de lecture	58
4.3.5	Exemples de vérification	59
	A- parallélisme	59

B- forme	60
4.3.6 Cales étalons.....	60
4.4 Machines de mesure et de contrôle	61
4.4.1 Projecteur de profil.....	61
4.4.2 Profilomètre.....	62
4.4.3 Comparateur pneumatique.....	62
4.5 Contrôle et vérification des dimensions à tolérance (fixe)	63
4.5.1 Tampons et les mâchoires	63
4.5.2 Différentes outils	64
Exercice 1.....	64
Exercices 2	65
Références bibliographiques	66

Introduction générale

La Métrologie c'est la science des mesures. Il est dérivé de la mesure grecque "metron" et des "logos" logiques. Ses éléments clés sont :

- L'établissement de normes de mesure qui sont internationalement acceptées et définies
 - L'utilisation d'équipements de mesure pour corréler la mesure dans laquelle les données sur les produits et les processus sont soumises à des spécifications
 - Calibrage régulier de l'équipement de mesure, traçable aux normes internationales établies
- Soutenir l'organisation dans l'évaluation quantitative des variables de processus (longueurs, dimensions, poids, pressions, etc).

Facteurs pris en compte pour déterminer la période d'étalonnage de l'équipement de mesure

- Intensité d'utilisation de l'équipement
- Usure possible due à l'utilisation ou à la dégradation
- Erreurs identifiées lors des étalonnages périodiques

Corrélation de mesure

- C'est la comparaison ou la corrélation des mesures d'un système de mesure avec les valeurs rapportées par un ou plusieurs systèmes de mesure différents.
- Un système ou un appareil de mesure peut être utilisé pour comparer des valeurs par rapport à un étalon connu, à son tour, il peut être comparé à la moyenne et à l'écart-type d'autres appareils similaires
- Vous pouvez également comparer les valeurs obtenues à partir de différentes méthodes de mesure utilisées pour mesurer différentes propriétés. Par exemple, la mesure de la dureté et de la résistance d'un métal, la température et l'expansion linéaire d'un article lorsqu'il est chauffé, le poids et le nombre de petites pièces.

Ce polycopié est organisé comme suit :

Tout d'abord, le chapitre 1 explique les différentes généralités concernant la métrologie, ainsi, le deuxième chapitre basé sur le système internationale d'unités (SI).

Le chapitre 3 est expliqué les différentes caractéristiques métrologiques des appareils de mesure.

Chapitre 4 sont respectivement consacrés sur la présentation des instruments de mesure et les méthodes de lecture de chaque instruments de mesure.

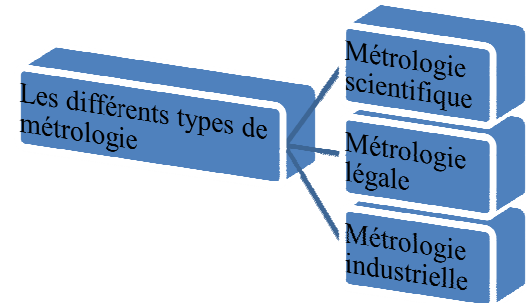
A l'issue de ce polycopié de métrologie, l'apprenant vous serez capables de:

- Connaître et définir les concepts de base de la métrologie ;
- Gérer les moyens de contrôle et de mesures des dimensions et des défauts de fabrication des pièces mécaniques ;
- Comprendre la lecture par les instruments de mesure ;
- Analyser les différents résultats de mesures ;
- Apprendre à l'étudiant les critères de précision des moyens des mesures ;
- Rédiger un rapport de mesure.



Chapitre 1

Généralités sur la métrologie

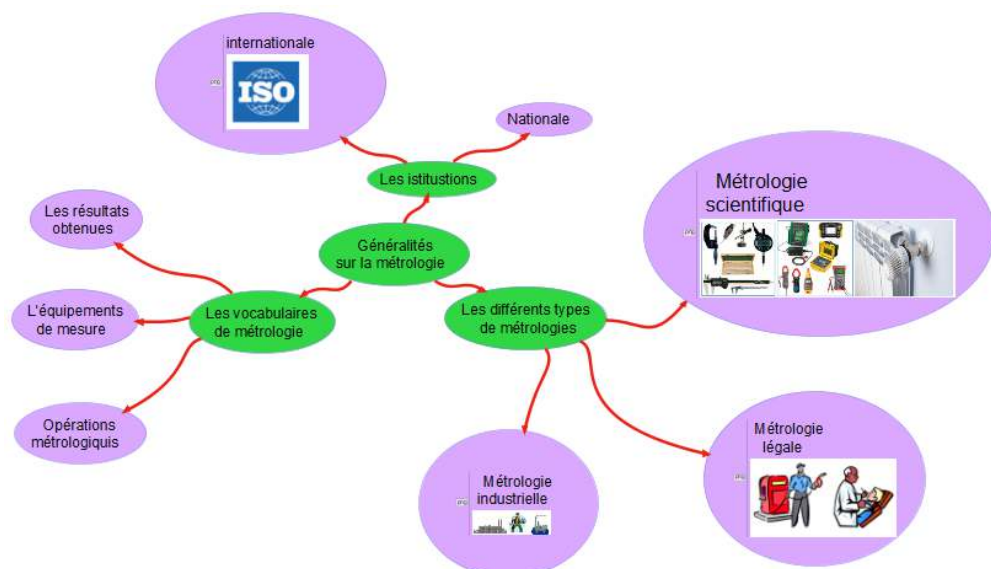


Objectifs

Dans ce chapitre l'objectif global consiste à:

- Découvrir les thèmes vocabulaires et les différentes normalisations en science de mesure.
- Différencier entre les différents types de métrologie ;
- Acquérir les connaissances nécessaires pour évaluer l'adéquation d'un appareil de mesure en fonction de ses spécifications et des résultats obtenus ;

Carte conceptuelle



1 Généralités sur la métrologie

1.1 Introduction

La métrologie est la science et l'art de la mesure et son applications, ainsi l'ensemble des moyens techniques utilisés pour le contrôle dimensionnelle des pièces pour tous les domaines son exceptions. Elle s'intéresse d'étudier les caractéristiques des appareils de mesure. La métrologie inclut tous les aspects théoriques et pratiques de la mesure, quelles que soient l'incertitude de mesure et champs d'application. Il couvre aussi les principes de base concernant les grandeurs et unités, les vocabulaires métrologiques de mesure et les institutions de normalisation.

La métrologie s'intéresse sur les différents types de métrologie (scientifique dit ou laboratoire, légale et industrielle). La métrologie est un vaste domaine.

Pourquoi mesurons-nous?

- Pour évaluer une grandeur et prendre une décision par rapport à eux par exemple :
- La température de notre corps pour diagnostiquer ;
- Le temps d'une carrière pour évaluer la performance ;
- Propriétés d'un produit pour évaluer la conformité aux exigences et aux normes ;
- Pour évaluer si un instrument de mesure correctement. Par exemple : balances commerciales, pompes à carburant, etc.
- Pour accepter ou refuser un produit de qualité dans tous les domaines ;
- Pour protéger la vie des personnes par des traitements de l'analyse médicale ;
- Pour déterminer les capacités de l'instrument de mesure ;
- Pour régir les différentes transactions ;
- Pour protéger l'environnement (suppose des exigences réglementaires sur les nuisances et la qualité de l'air et de l'eau, et appelle des mesures);
- Pour respecter la conduite sécuritaire, les contraintes de vitesse, de taux d'alcoolémie, d'efficacité du freinage des véhicules, et des mesures pour constater leur respect.

1.2 Les différents types de métrologie

Dans le domaine de la science de la mesure, on distingue trois types de métrologie différents:

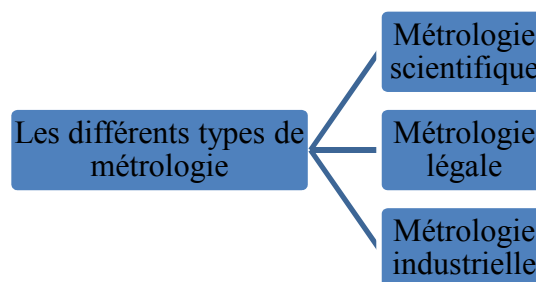


Figure 1.1. Différents types de métrologie

1.2.1 Métrologie 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. 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. Fournit la base des mesures, assure la traçabilité cohérente avec le Système international d'unités.

Elle traite des problèmes techniques et expérimentaux de mesure, notamment : la réalisation expérimentale d'unités de mesure et la conservation et le maintien des étalons, ainsi que la recherche et le développement de nouvelles techniques de mesure. Elle englobe différents domaines de spécialité, par exemple :

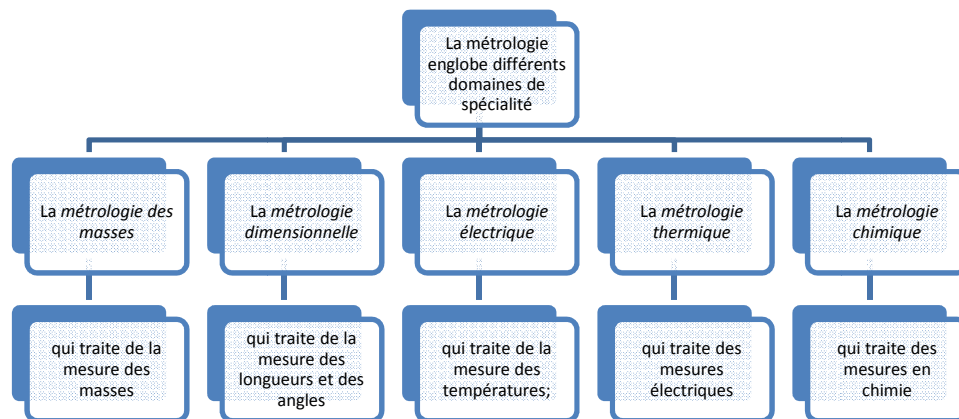


Figure 1.2. Les différents domaines de spécialité de métrologie



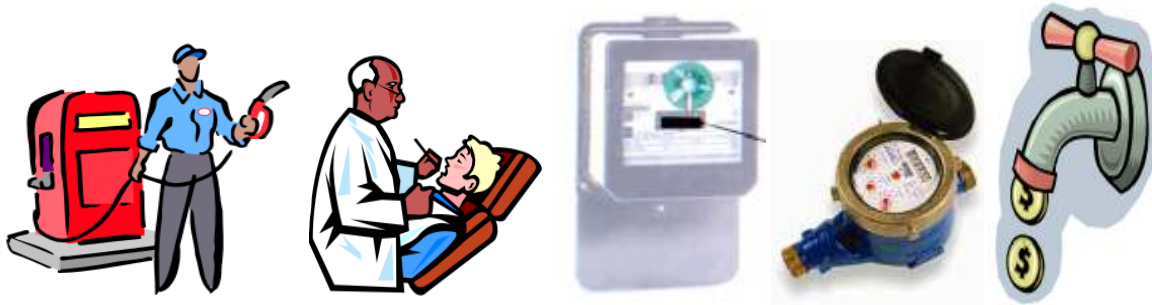
1.2.2 Métrologie légale

Elle traite des obligations techniques et des exigences légales pour assurer la garantie publique ; c'est-à-dire assurer l'exactitude des résultats de mesure car il est de l'intérêt de l'État de garantir sa qualité.

Établit les dispositions nécessaires pour assurer un contrôle adéquat instruments de mesure métrologique appliqués dans :

- Santé
- Protection de l'environnement
- Sécurité : prévention des accidents
- Transactions commerciales

Ainsi cette type de métrologie gère les instruments de mesure qui ont un rôle commercial.



1.2.3 Métrologie industrielle

La métrologie industrielle traite les mesures effectuées des applications spécifiques par exemple en quantités physiques telles que le temps, la masse, la longueur. Il aborde les enjeux liés aux mesures et à leurs résultats dans le contrôle qualité des productions et des procédés. Ainsi, Il établit les dispositions pour y parvenir, dans les processus industriels, les instruments de mesure sont en bon état technique et que les mesures sont effectuées correctement.



Syntaxe :

Ainsi, couvre toutes les activités métrologiques dans l'entreprise : contrôle des processus de mesure, gestion des instruments de mesure, procédures de vérification /étalonnage (traçabilité des mesures).

1.3 Les vocabulaires métrologiques

En effet, un vocabulaire est un dictionnaire terminologique contenant les désignations et définitions concernant un ou plusieurs domaines spécifiques. Les vocabulaires métrologiques basés sur les trois axes principaux, les vocabulaires des résultats obtenus, les vocabulaires des opérations métrologiques et les vocabulaires des équipements de mesure.

Vocabulaire fournit un ensemble de définitions et de termes associés, pour un système de concepts fondamentaux et généraux utilisés en métrologie.

1.3.1 Résultats obtenue

On métrologie les résultats obtenus basées sur les vocabulaires suivantes :

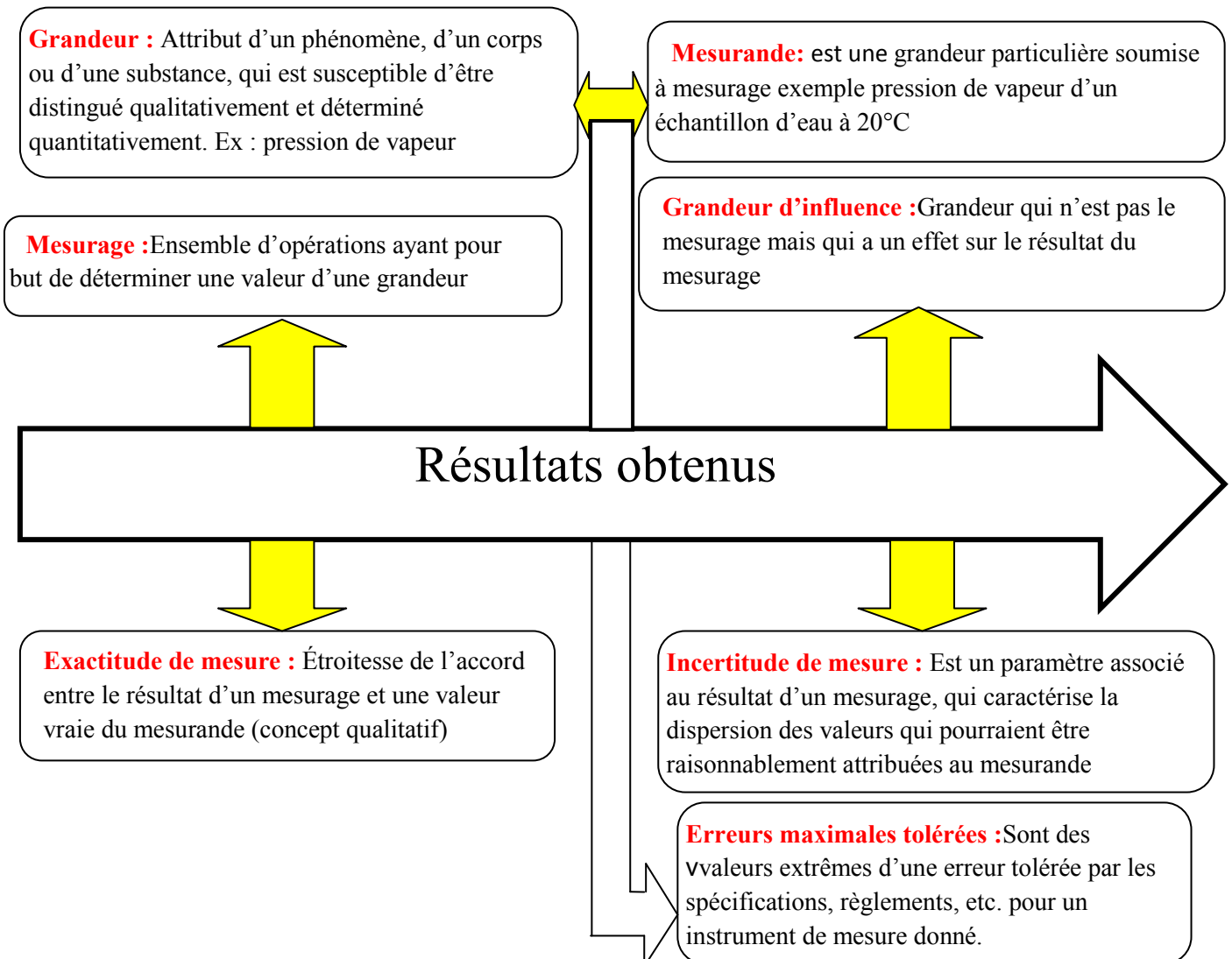


Figure 1. 3. Vocabulaires des résultats obtenus

1.3.2 Opérations métrologiques

On métrologie les opérations métrologiques basées sur les vocabulaires suivantes :

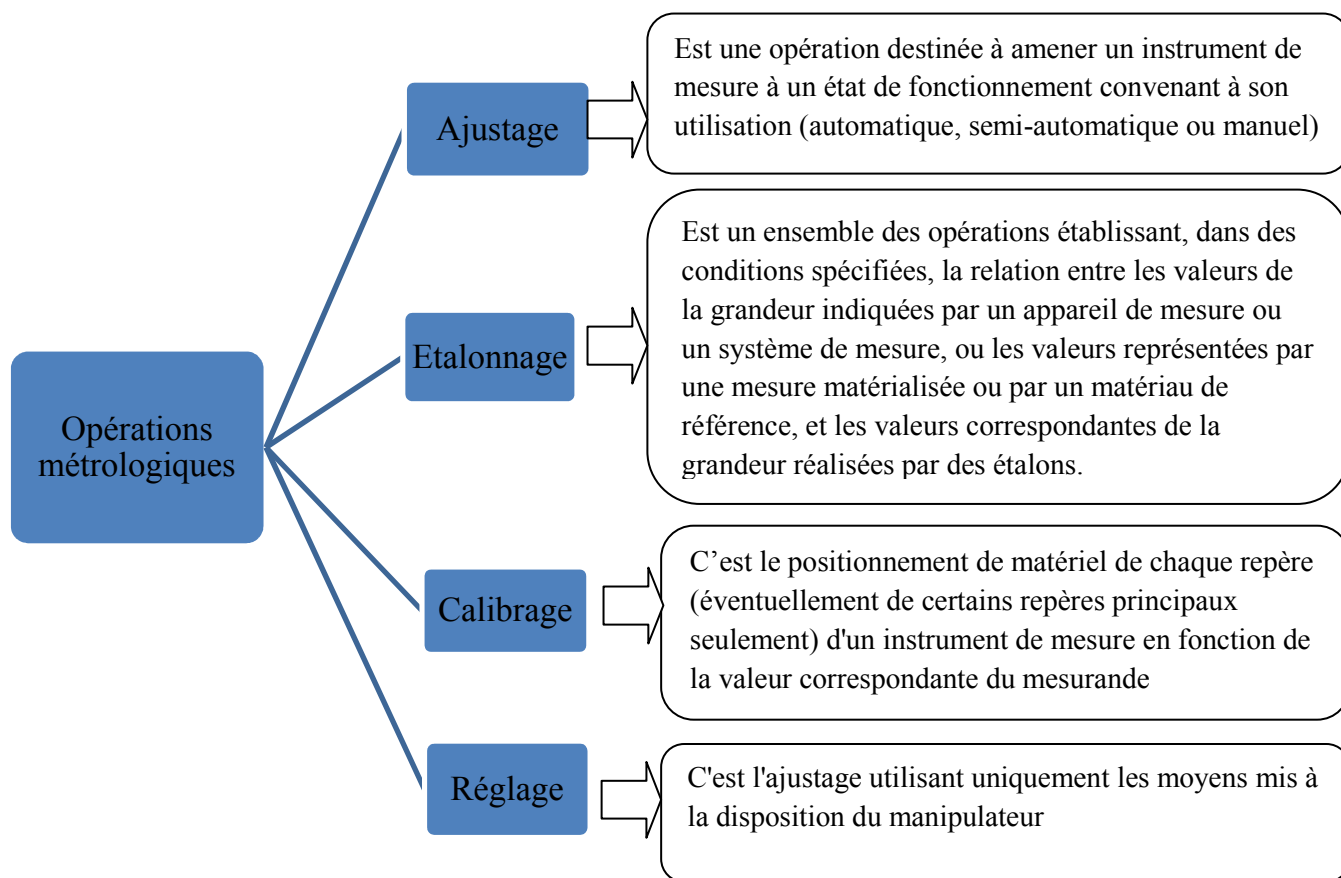


Figure 1.4. Vocabulaires des opérations métrologiques

1.3.3 Equipements de mesure

On métrologie les équipements de mesure basées sur les vocabulaires suivantes :

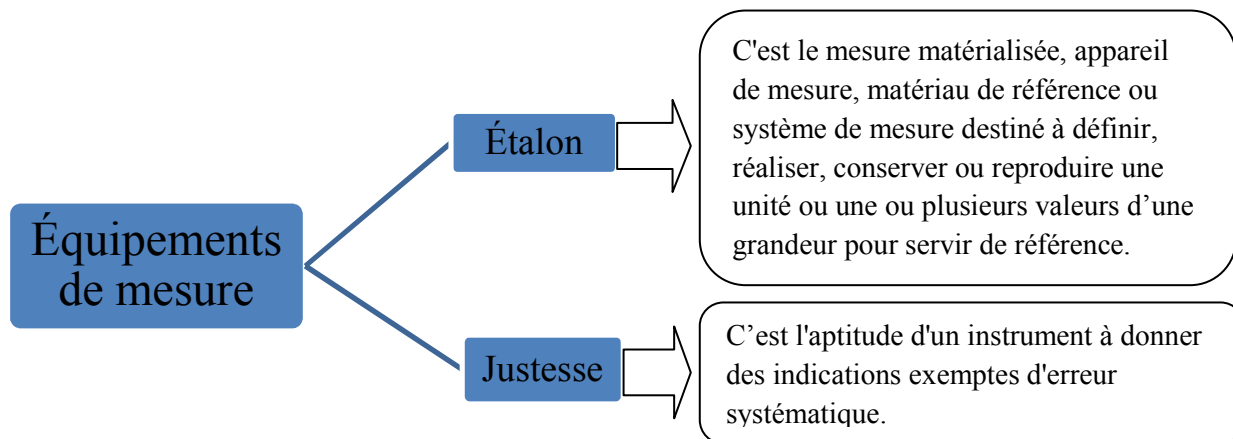


Figure 1.5. Vocabulaires des équipements de mesure

1.4 Les institutions nationale et internationale de normalisation de métrologie

La normalisation (également appelée standardisation) est le processus d'élaboration, d'application et d'amélioration des normes utilisées dans différentes activités scientifiques, industrielles ou économiques, afin de les ordonner et de les améliorer. Pour sa part, l'American Society for Testing and Materials (ASTM) définit la normalisation comme le processus de formulation et d'application des règles, pour une approche ordonnée d'une activité spécifique, au bénéfice et avec la coopération de tous les acteurs.

Selon l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation), la normalisation est l'activité qui vise à établir, face à des problèmes réels ou potentiels, des dispositions pour des usages communs et répétés, afin d'obtenir un niveau de commande optimal dans un contexte donné, cela peut être technologique, politique ou économique. Ainsi, les institutions de normalisation sont des organisateurs des lois autorisés pour contrôler les produits, ainsi sont des revues, Associations, bureaux, laboratoires, comités, conférences, services et collèges...

La normalisation est la rédaction et l'approbation de normes qui sont établies pour garantir le couplage d'éléments construits indépendamment, ainsi que garantir le remplacement si nécessaire, garantir la qualité des éléments fabriqués, la sécurité de fonctionnement et le travail avec la responsabilité sociale.



1.4.1 Abréviations des institutions nationale et internationale de métrologie

Abréviations	Instituts nationaux
PTB	(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)
LNE	Laboratoire National d'essais et de Métrologie, voir le site spécialisé : www.metrologiefraçais.fr
NPL	National Physical Laboratory
Nmi	Nederlands Meetinstituut
METAS	métrologie et Accréditation suisses

Tableau 1. 1. Abréviations des Instituts nationaux de métrologie

Abréviations	Systèmes de Normalisations
SI	Système International (d'unités)
DIN	Deutsche Industrie Normen
NF	Normes françaises

Tableau 1. 2. Abréviations des Systèmes de normalisation

Abréviations	Instituts de Normalisation internationaux
INAPI	Institut Nationale de la Propriété Industrielle (qui gère les normes en Algérie)
OANM	Organisation Arabe des Normes et Mesures (dont participent la totalité des pays arabes)
AFNOR	Association Française de Normalisation
CEN	Comité Européen de Normalisation
DIN	Deutsches Institut für Normung
NBN	Bureau de Normalisation est l'organisme belge responsable de la réalisation et publication des normes en Belgique
ISO	International Standard Organisation
BNM	Bureau National de Métrologie
NIST	National Institute for Science and Technology
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale
Metrologia	Revue internationale sur les aspects scientifiques de la métrologie

Tableau 1. 3. Abréviations des organismes internationaux

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

Tableau 1. 4. Abréviations des organismes d'accréditation

Abréviations	Autres Instituts et Organismes
BIPM	Bureau Internationale des Poids et Mesures
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures
CIPM	Comité Internationale des Poids et Mesures
CEI	Commission électrotechnique internationale
IFCC	Fédération internationale de chimie clinique et de laboratoires médicaux
UICPA	Union internationale de chimie pure et appliquée
IUPAP	Union internationale de physique pure et appliquée

Tableau 1.5. Abréviations des instituts et organismes

1.4.2 Dates et des événements en métrologie

Dates	Les institutions internationales (Evènements)
1795	Instauration du système métrique en France
1875	Création du BIPM convention du mètre
1955	Création de L'OIML (métrologie légale)
1960	Création du système Internationale (SI)
1969	Création du BNM (coordonner et animer la métrologie, agréer et habilitier les laboratoires d'étalonnage et d'essais)
1984	VIM (Vocabulaire Internationale de Métrologie)
1993	GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurements, ou Guide pour l'expression d'incertitude dans les mesures)
1994	Création du GIP BNM (groupement d'intérêt publique nationale en métrologie)
1994	Création du COFRAC (comité français pour l'accréditation, en particulier des laboratoires d'étalonnage et d'essais)
2002	Collège Français de métrologie (forum nationale d'échanges techniques en métrologie)

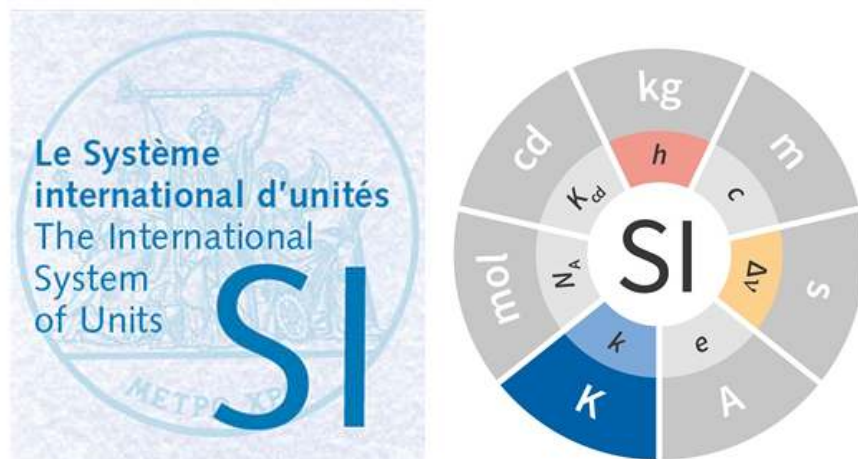
Tableau 1. 6. Dates et des événements des institutions internationales

Dates	Les institutions nationales (Evènements)
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 Nationale de métrologie Légale
2002	Conseil Nationale de Métrologie créé par le décret Exécutif N°02-220 du 20 juin 2002
2005	LNE (Laboratoire Nationale d'essais) reprend les missions du BNM et change de nom (Laboratoire Nationale de métrologie et d'Essais)

Tableau 1. 7. Dates et des événements des institutions nationales

Chapitre 2

Système internationale d'unités

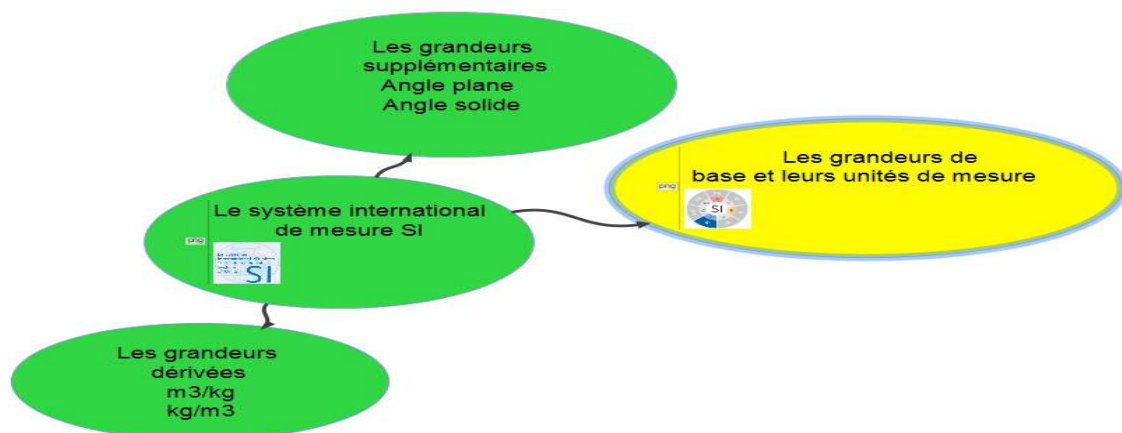


L'objectif

À l'issue de ce chapitre, l'étudiant pourra :

- Connaître le système internationale (SI) et leurs unités de base ;
- Connaître les différentes grandeurs de base, dériver et supplémentaires ;
- Démontrer les analyses dimensionnelles des unités.

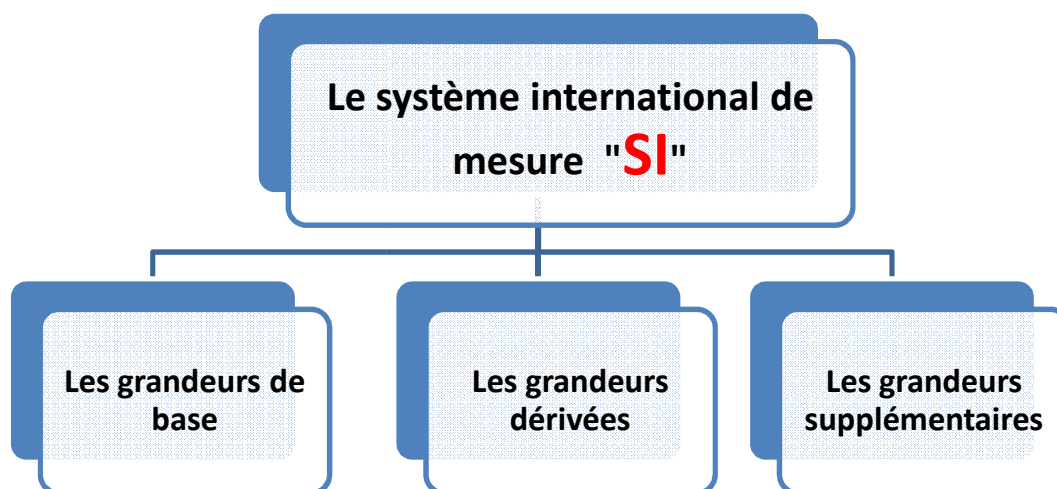
Carte conceptuelle



2 Le système international de mesure SI

2.1 Introduction

Le Système international d'unités (SI, en abrégé français). C'est le système légal d'unités en FRANCE (décret 61-501 du 3 mai 1961 modifié par le décret 82-203 du 26 février 1982 et par le décret 85-1500 du 30 décembre 1985). Système international (d'unités)) est la forme moderne du système métrique et le système de mesure le plus utilisé. Il comprend un système cohérent d'unités de mesure reposant sur sept unités de base que sont l'ampère, le kelvin, la seconde, le mètre, le kilogramme, la candela et la mole. Ainsi, le SI est un ensemble de vingt préfixes aux noms et symboles d'unité qui peuvent être utilisés lors de la spécification de multiples et les fractions des unités. Le système spécifie également les noms de 22 unités dérivées, telles que le lumen et le watt, pour d'autres quantités physiques courantes.



2.2 Les grandeurs de base

Les sept unités de base avaient été choisies pour des raisons historiques, elles doivent être considérées, par convention, comme indépendantes du point de vue dimensionnel (Tableau 2-1). Les unités de base ont été conservées dans l'actuel SI, même si le SI en lui-même est désormais défini à partir des sept constantes précédemment mentionnées.

Système cohérent d'unités adopté et recommandé par la Conférence générale des Poids et Mesure (CGPM).

NOTE : Le SI repose actuellement sur les sept unités de base suivantes:

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

Tableau 2.1. Les sept Unités de base du système (SI)

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

Dans le (SI), le mètre (symbole : m) est l'unité de longueur, qui permet de mesurer une distance. La définition du compteur basée sur le prototype international de platine-iridium, en vigueur dans les conditions précisées depuis 1889 est toujours conservée au (BIPM)¹, avait été remplacée par la 11^{ème} CGPM (1960) par une définition basée sur la longueur d'onde d'un rayonnement krypton-86.

Cette définition a été adoptée afin d'améliorer la précision avec laquelle le compteur peut être réalisé. À son tour, cela a été remplacé en 1983 par la 17^{ème} CGPM² (1984). Ainsi, elle est définie en prenant la valeur numérique fixe de la vitesse par la lumière pendant une durée de 1/299792458 de seconde.

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

Dans le (SI), le kilogramme (symbole : kg) est l'unité de masse ; Le prototype international du kilogramme, Ce prototype international, en platine-iridium, est conservé au BIPM dans les conditions spécifiées par la 1^{ère} CGPM en 1889, qui a approuvé ce prototype et déclaré :

Ce prototype sera considéré ci-après comme une unité de masse.

La 3^{ème} CGPM (1901), dans une déclaration visant à éliminer l'ambiguïté qui se posait dans l'utilisation actuelle du terme "poids", a confirmé que :

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

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

La seconde, unité de temps, était à l'origine définie comme la fraction 1/86 400 de la journée solaire moyenne. La définition exacte du «jour solaire moyen» a été laissée aux astronomes.

Cependant, les observations ont montré que cette définition n'était pas satisfaisante en raison des irrégularités de la rotation de la Terre. Pour parvenir à une définition plus précise de l'unité de temps, la 11^{ème} CGPM (1960, Résolution 9) a approuvé une définition, fournie par l'Union Astronomique Internationale, qui était basé sur l'année tropique 1900. Cependant, la recherche expérimentale avait déjà montré qu'un modèle de temps atomique, basé sur le symbole c_0 (ou parfois simplement c), est le symbole conventionnel de la vitesse de la lumière du vide. Le symbole, m (K), est utilisé pour désigner la masse du prototype Kilogramme international, K.

Une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule pourrait être effectuée et reproduite avec une précision beaucoup plus grande. Alors qu'une définition très précise de l'unité de la science était indispensable pour la science et la technologie

Time, la 13^{ème} CGPM (1967/68, Résolution 1; CR, 103 et Métrologie, 1968, 4, 43) a remplacé la définition de la seconde par la suivante:

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de rayonnement correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfin de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

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

Les unités électriques, dites "internationales", de courant et de résistance, ont été introduites par le Congrès international de l'électricité, tenu à Chicago en 1893, et les définitions de

¹Bureau international des poids et mesure

²Conférence Générale des Poids et Mesures qui a lieu tout les 4 ans composée par les représentant des états membres de la convention du mètre.

l'ampère "international" et de l'ohm "international". Ils ont été confirmés par la Conférence internationale de Londres en (1908).

Bien qu'il soit déjà évident à l'occasion de la 8^{ème} CGPM (1933) qu'il y avait une volonté unanime de remplacer ces unités «internationales» par les soi-disant «unités absolues», la décision officielle de les supprimer n'a été adoptée que lors de la 9^e CGPM (1948)

qui a adopté l'ampère comme unité d'intensité du courant électrique, conformément à la définition suivante proposée par le CIPM (1946, Résolution 2).

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, rester dans deux conducteurs parallèles, rectilignes et longs infini, de section circulaire négligeable et situé à une distance de 1 mètre l'un de l'autre, dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à 2×10^{-7} Newton par mètre de longueur.

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

Le kelvin est l'unité de la température thermodynamique, par définition cette unité a été donnée en substance par la 10^{ème} CGPM (1954, Résolution 3) qu'a choisi le point triple de l'eau comme point fixe fondamental et lui a attribué la température de 273,16 K.

La 13^{ème} CGPM (1967, Résolution 3) a également décidé que l'unité kelvin et son symbole K devaient être utilisés pour exprimer un intervalle ou une différence de température, en degrés Celsius peut cependant être exprimé en degrés Kelvin ainsi qu'en degrés Celsius. Ainsi, Elle est définie en prenant la valeur numérique fixe de la constante de Boltzmann k à $1,380\,649 \times 10^{-23}$.

La température Celsius t est définie comme la différence $t = T - T_0$ entre les deux températures thermodynamiques T et T_0 où $T_0 = 273,15$ K. Un intervalle ou une différence de température peut être exprimé soit en kelvins soit en degrés Celsius. L'unité «degré Celsius» est égale à l'unité «kelvin». »

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

La mole est l'unité de la quantité de matière, définition de la 14^{ème} CGPM (1971) résolution 3
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. Une mole d'atomes contient environ $6,02214040 \times 10^{23}$ atomes, ce nombre est appelé Nombre d'Avogadro, son symbole est N_A .

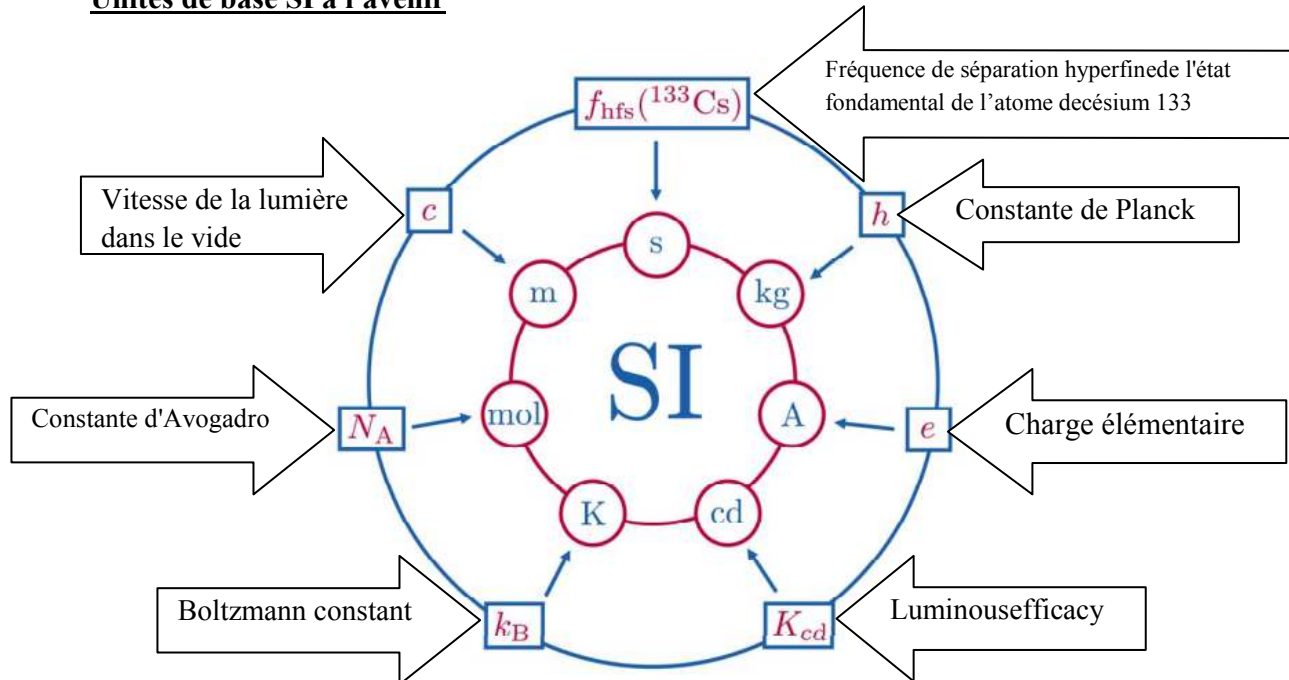
Mais alors que les physiciens ont séparé les isotopes dans le spectrographe de masse et attribue la valeur 16 à l'un des isotopes de l'oxygène, les chimistes attribuent cette même valeur au mélange (légèrement variable) des isotopes 16, 17 et 18, qui est pour eux l'élément naturel de l'oxygène. Enfin, un accord entre l'Union internationale de physique pure et appliquée (IUPAP) et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) a mis fin à cette dualité en 1959/60. Les physiciens et les chimistes ont depuis lors convenu d'attribuer la valeur 12 à l'isotope 12 du carbone. L'échelle unifiée ainsi obtenu donne des valeurs de «masse atomique relative».

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

La candela est l'unité de la quantité d'intensité lumineuse, définition de la 16^{ème} CGPM (1979) - résolution 3. En raison des difficultés expérimentales de réalisation d'un radiateur

Planck à haute température et des nouvelles possibilités offertes par la radiométrie, c'est-à-dire la mesure de la puissance de rayonnement optique, la 16^{ème} CGPM a adopté en 1979 la nouvelle définition suivante: La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540310 12 hertz et qui a une intensité rayonnante dans cette direction de (1/683) watt par stéradian.

Unités de base SI à l'avenir



2.3 Les unités dérivées

Sont exprimées algébriquement en termes d'unités de base au moyen des symboles mathématiques de multiplication et de division (voir le tableau 2. 2 pour quelques exemples). Ainsi, les unités dérivées font partie du système international d'unités et sont déduites des sept unités de base. Elles sont formées de manière cohérente à partir des unités de base.

Certaines unités dérivées ont reçu des noms et des symboles spéciaux. Ces noms et symboles sont donnés dans les tableaux 2. 3 et 2.4 ; ils peuvent eux-mêmes être utilisés pour exprimer d'autres unités dérivées (voir le tableau 2.5 pour quelques exemples).

Dans les tableaux 2.3, 2.4, 2.5 et 2.6, la dernière colonne donne les expressions des unités SI concernées en termes d'unités de base SI.

		Unité SI
Grandeurs	Unité	Symbole
surface	mètre carré	m ²
volume	mètre cube	m ³
vitesse	Mètre par seconde	m/s
Accélération	Mètre par seconde carré	m/s ²
numéro d'onde	compteur réciproque	m ⁻¹
volume spécifique	mètre cube par kilogramme	m ³ /kg
densité, masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m ³
ampère de densité	courant par mètre carré	A/m ²
intensité du champ magnétique	ampère par mètre	A/m
concentration (de la quantité de substance)	mole par mètre cube	mol/m ³
luminance	candela par mètre carré	cd/m

Tableau 2.2. Les unités dérivées

Grandeur	Nom	Symbole de l'unité	Expression par d'autres unités	Expression par l'unité de base de (SI)
Fréquence	<i>hertz</i>	Hz		s ⁻¹
force	newton	N		m.kg.s ⁻²
Pression	pascal	Pa	N/m ²	m ⁻¹ .kg. s ⁻²
Travail Energie	joule	J	N.m	m ² .kg.s ⁻²
Puissance	watt	W	J/s	m ² .kg.s ⁻³
Quantité d'électricité	coulomb	C		s.A
Force électromotrice, différence de potentiel	volt	V	W/A	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
Capacité électrique	farad	F	C/V	m ⁻² .kg ⁻¹ .s ⁴ .A ²
Résistance, Impédance	ohm	Ω	V/A	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻²
Conductance	siemens	S	A/V	m ⁻² .kg ⁻¹ .s ³ .A ²
Flux d'induction magnétique	weber	Wb	V.S	m ² .kg.s ⁻² .A ⁻¹
Induction magnétique	tesla	T	Wb/m ²	kg.s ⁻² .A ⁻¹
Inductance électrique	henry	H	Wb/A	m ² .kg.s ⁻² .A ⁻²
Température thermodynamique	Degree Celsius	C°		K
Flux lumineux	lumen	lm		cd .sr ^(b)
Eclairement lumineux	lux	lx	Lm/m ²	m ⁻² . cd .sr ^(b)

UnitéSI

Tableau 2.3. Les Unités dérivées SI avec des noms spéciaux

Grandeur	Nom	Symbole de l'unité	Expression par d'autres unités	Expression par l'unité de base de (SI)
Activité (radioactive)	becquerel	Bq		s^{-1}
Énergie communiquée massique, dose absorbée, kerma	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
Équivalent de dose	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

Unité SI

Tableau 2.4. Unités dérivées SI avec des noms spéciaux admis pour des raisons de protection de la santé humaine

Grandeur	Nom	Symbole de l'unité	Expression par l'unité de base de (SI)
Viscosité dynamique	<i>Pascal second</i>	Pa.s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
Moment de force	Newton mètre	N.m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Tension superficielle	Newton par mètre	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
Intensité acoustique	Watt par mètre carré	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
Capacité thermique Entropie	Joule par kelvin	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
capacité thermique spécifique, entropie spécifique	Joule par kilogramme kelvin	J/(kg.k)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
Energie massique	<i>Joule par kilogramme</i>	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
Conductivité thermique	Watt par mètre kelvin	W/(m.k)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
densité énergétique	Joule par mètre cubique	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Champ électrique	Volt par mètre	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
densité de charge électrique	Coulomb par mètre cubique	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
Déplacement électrique	Coulomb par mètre carré	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
Permittivité	Farad par mètre	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^{-1}$
Perméabilité	Henry par mètre	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Energie molaire	Joule par mol	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
Capacité de chaleur	Joule par mol kelvin	J/(mol.K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Dose d'exposition	Coulomb par kilogramme	C/kg	$Kg^{-1} \cdot s \cdot A$
Dose absorbée	Gray par scande	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$

Tableau 2.5. Exemples d'unités dérivées SI exprimées au moyen de noms spéciaux

2.4 Unités supplémentaires

Cet unité contient deux unités : l'unité SI d'angle plan, le radian, et l'unité SI d'angle solide, le stéradian (11^{ème} CGPM (1960), résolution 12).

Considérant que l'angle plan est généralement exprimé comme le rapport entre deux longueurs et l'angle solide comme le rapport entre une zone et le carré d'une longueur. Le CIPM (1980) a précisé que, dans le Système International, les unités supplémentaires radian et stéradian sont des unités dérivées sans dimension. Cela implique que les quantités angle plan et angle solide sont considérés comme des quantités dérivées sans dimension.

Grandeur	Nom	Symbole	Expression par l'unité de base(SI)
Angle plane	<i>radian</i>	rad	$m \cdot m^{-1}=1$
Angle solide	stéradian	sr	$m^2 \cdot m^{-2}=1$

Tableau 2.6. Unités supplémentaires SI [le radian et le stéradian]

Grandeur	Nom	Symbole
vitesse angulaire	<i>Radian par second</i>	rad/s
accélération angulaire	Radian par second carré	rad/s ²
intensité radiante	Watt par stéradian	W/sr
éclat	Watt par mètre carré stéradian	W/(m ² .sr)

Tableau 2.7. Exemples d'unités dérivées SI formées à l'aide d'unités supplémentaires

Ces unités supplémentaires peuvent être utilisées dans les expressions d'unités dérivées pour faciliter la distinction entre des quantités de nature différente mais de même dimension. Le tableau 2.7 présente quelques exemples d'utilisation d'unités supplémentaires pour former des unités dérivées.

2.5 Règles d'écriture et d'utilisation des symboles d'unité SI

Les principes généraux concernant l'écriture des symboles d'unité ont été adoptés par la 9^{ème} CGPM (1948, Résolution 7):

1. Le type romain (vertical), en général en minuscules, est utilisé pour les symboles d'unité. SI, cependant, le nom de l'unité est dérivé d'un nom propre, la première lettre du symbole est en majuscule.

2. Les symboles d'unité sont inchangés au pluriel.

3. Les symboles d'unité ne sont pas suivis d'un point.

Pour assurer l'uniformité dans l'utilisation des symboles d'unité SI, ISO International

Les normes donnent certaines recommandations. En suivant ces recommandations :

a) Le produit de deux unités ou plus peut être indiqué de l'une des manières suivantes³, par exemple : *N.m* ou *N.m*

³États-Unis Note de l'éditeur : Voir la norme américaine ANSI / IEEE Std 268-1982 Metric Practice, qui stipule qu'aux États-Unis, seul le point en relief doit être couramment utilisé.

b) Un solidus (trait oblique, /), une ligne horizontale ou des exposants négatifs peuvent être utilisés pour exprimer une unité dérivée formée de deux autres par division, par exemple.

c) Le solidus ne doit pas être répété sur la même ligne sauf si l'ambiguïté est évitée par des parenthèses. Dans les cas complexes, des exposants négatifs ou des parenthèses doivent être utilisés, par exemple :

m/s ou m. s⁻² mais non m/s/s

m.kg/(s³.A) ou m.kg.s⁻³.A⁻¹ mais non m. kg/s³/A

2.6 Multiples décimaux et sous-multiples d'unités SI

2.6.1 Préfixes SI

La 11^{ème} CGPM (1960, Résolution 12) a adopté une première série de préfixes et symboles de préfixes pour former les noms et symboles des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI. Des préfixes pour 10⁻¹⁵ et 10⁻¹⁸ ont été ajoutés par la 12^{ème} CGPM (1964, résolution 8), ceux pour 10¹⁵ et 10¹⁸ par la 15^{ème} CGPM (1975, résolution 10) et ceux pour 10²¹, 10²⁴, 10⁻²¹ et 10⁻²⁴ ont été proposés par le CIPM (1990) pour approbation par la 19^e CGPM (1991).

Facteur	Préfix	Symbole	Facteur	Préfix	Symbole
10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻¹	deci	d
10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²	centi	c
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻³	milli	m
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ¹²	tera	T	10 ⁻⁹	nano	n
10 ⁹	giga	G	10 ⁻¹²	pico	p
10 ⁶	mega	M	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ³	kilo	K	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²	hecto	h	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ¹	deka ⁴	da	10 ⁻²⁴	yocto	y

Tableau 2.8. Les unités Préfixes SI

2.6.2 Règles d'utilisation des préfixes SI

Conformément aux principes généraux adoptés par l'ISO, le CIPM recommande de respecter les règles suivantes pour l'utilisation des préfixes SI:

1. Les symboles de préfixe sont imprimés en caractères romains (droits) sans espacement entre le symbole de préfixe et le symbole d'unité.

2. Le groupement formé par le préfixe attaché au symbole d'unité constitue un nouveau symbole inséparable (d'un multiple ou d'un sous-multiple de l'unité concernée) qui peut être élevé à une puissance positive ou négative et qui peut être combiné avec d'autres symboles d'unité pour former des symboles d'unité composée, par exemple : $1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$

$$1 \text{ cm}^{-1} = (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$$

⁴USA Editor note: En dehors des États-Unis, l'orthographe 'deca' est largement utilisée.

3 noms de multiples et sous-multiples des unités sont formés au moyen des préfixes du tableau 2.9

$$1 \mu s^{-1} = (10^{-6} s)^{-1} = 10^6 s^{-1}$$

$$1 V/cm = (1 V)/(10^{-2} m) = 10^2 V/m$$

3. Les préfixes composés, c'est-à-dire les préfixes formés par la juxtaposition de deux préfixes SI ou plus, ne doivent pas être utilisés, par exemple : **1 nm** mais pas : **1 mμm**

4. Un préfixe ne doit jamais être utilisé seul

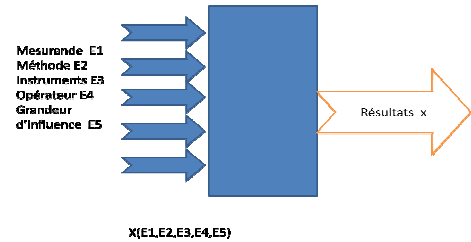
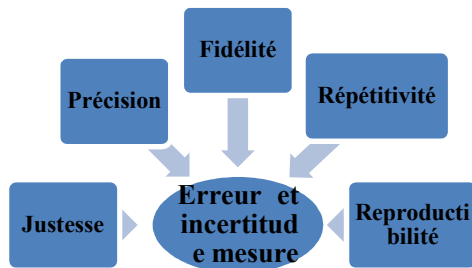
par exemple : **$10^6/m^3$** mais pas : **M/m^3**

Facteur multiplicateur	Préfixe	Symbole
1000 000 000 000= 10^{12}	<i>tera</i>	T
1000 000 000= 10^9	<i>giga</i>	G
1000 000= 10^6	<i>mega</i>	M
1000= 10^3	<i>kilo</i>	k
100= 10^2	<i>hecto</i>	h
10= 10^1	<i>deka</i>	da
0.1= 10^{-1}	<i>deci</i>	d
0.01= 10^{-2}	<i>Centi</i>	c
0.001= 10^{-3}	<i>milli</i>	m
0.000 001= 10^{-6}	<i>micro</i>	μ
0.000 000 001= 10^{-9}	<i>nano</i>	n
0.000 000 000 001= 10^{-12}	<i>pico</i>	p

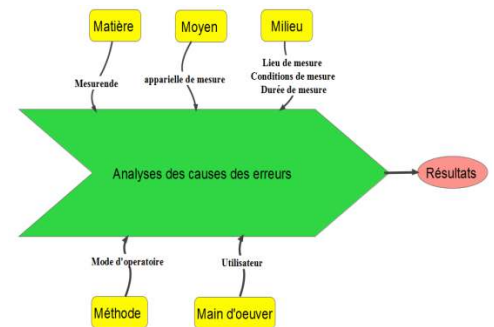
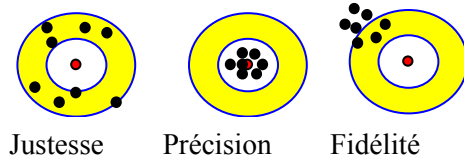
Tableau 2.9. Les unités multiples et sous-multiples formés au moyen des préfixes

Chapitre 3

Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure



Résultat de mesure = la valeur numérique x unité



L'objectif

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

- Connaître les différentes caractéristiques métrologiques des appareils de mesure,
- Différencier entre l'erreur aléatoire et l'erreur systématique,
- Identifier et interpréter les différentes spécifications d'un dessin de définition.

Carte conceptuelle du chapitre 3



3 Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

3.1 Introduction

Les caractéristiques métrologiques des appareils de mesure est très critique et bénéfique pour le processus de sélection. Les caractéristiques qui montrent les performances d'un instrument sont l'exactitude, la précision, la justesse, la fidélité, la répétitivité et la reproductibilité, ces caractéristiques, elle permet aux utilisateurs de sélectionner l'instrument le plus approprié pour des travaux de mesure spécifiques.

3.2 Erreur et incertitude (Justesse, précision, fidélité, répétitivité, reproductibilité d'un appareil de mesure

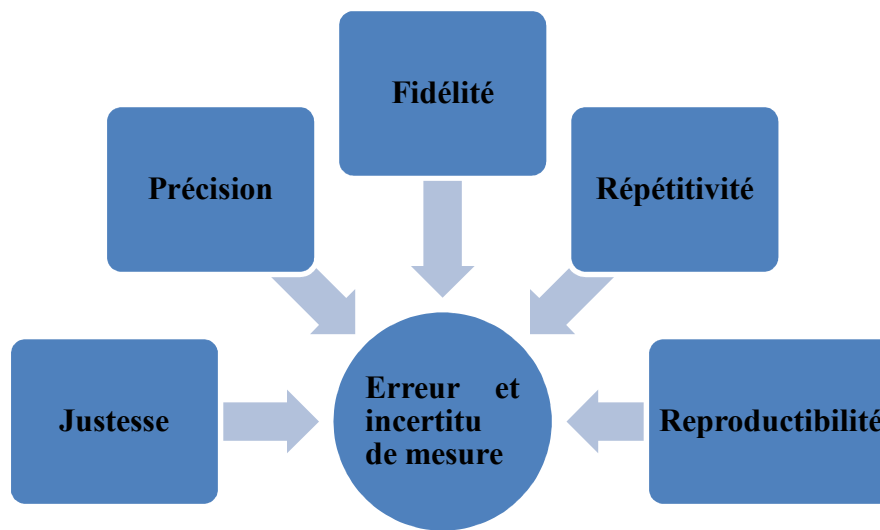


Figure 3.1. Différents caractéristiques métrologiques d'un appareil de mesure

3.2.1 Précision

C'est une mesure de cohérence ou de répétabilité, c'est-à-dire que les lectures successives ne diffèrent pas. La précision est définie comme la capacité d'un instrument à afficher la même lecture lorsqu'il est utilisé à chaque fois (reproductibilité de l'instrument). Un instrument précis n'est pas nécessairement exact. La précision d'appareil de mesure peut également être entachée par des causes extérieures : erreur opératoire, erreur provoquée par les grandeurs d'influences (température, pression etc), erreur de référence ou de d'étalonnage, erreur d'hystérésis, erreur de finesse etc.

Un instrument de mesure est d'autant plus précis que les résultats de mesure qu'il indique coïncident avec la valeur vraie (par définition théorique). Que l'on cherche à mesurer. En dehors des conditions opératoires, la précision d'un appareil est essentiellement liée à deux types de caractéristiques : la justesse et la fidélité. Un appareil est précis s'il est à la fois juste et fidèle fig.(3.2). La précision des mesures est très importante pour la fabrication d'un produit de qualité. La précision est le degré d'accord entre la dimension mesurée et sa véritable ampleur.

La précision peut également être définie comme le montant maximal par lequel le résultat diffère de la valeur réelle ou par la proximité des valeurs mesurées avec sa valeur réelle, souvent exprimée en%.

3.2.2 Justesse

Ecart entre la mesure obtenue et la valeur «vraie» ou la valeur de référence (erreur systématique)

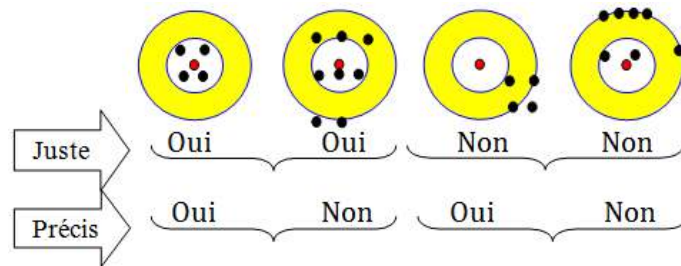


Figure 3.2. Présentations schématiques de la justesse et la précision

3.2.3 Fidélité

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.

- Ces conditions comprennent :
- réduction au minimum des variations dues à l'observateur ;
- même mode opératoire de mesure ;
- même observateur ;
- même équipement de mesure, utilisé dans les mêmes conditions ;
- même lieu ; répétition durant une courte période de temps.
- La fidélité peut s'exprimer quantitativement avec des caractéristiques de dispersion des résultats.

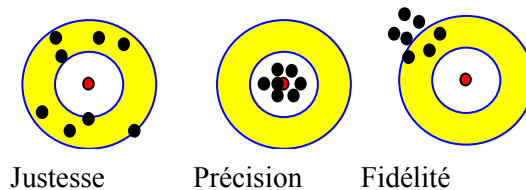


Figure 3.3. Présentations schématiques de la justesse, la précision et la fidélité

3.2.4 Reproductibilité

La reproductibilité est la cohérence et la proximité de l'accord entre les différents résultats de la même quantité de mesures avec le même système de mesure. Il est lié à l'écart type de la distribution des moyennes de l'évaluateur variabilité mesurée par un écart-type ou un indice dans des conditions (opérateur) où un ou plusieurs facteurs contrôlables sont variés :

- par différents observateurs ;
- plusieurs pièces ;
- par différentes méthodes ;
- par des différents instruments ;
- sous différentes conditions, lieux, horaires etc.

- Elle peut être exprimée en termes de dispersion des résultats.

Remarque : opérateur peut être remplacé par un autre facteur comme méthode ou périodes temps.

3.2.5 Répétabilité

C'est la capacité de l'instrument de mesure à répéter les mêmes résultats pendant l'acte de mesure pour la même quantité est appelée répétabilité. Ainsi, il est lié à l'écart type des valeurs mesurées dans la répétabilité tous les facteurs sont maintenus "constants"

- même observateur ;
- même instrument ;
- mêmes conditions ;
- même lieu de mesure ;
- même méthode de mesure,
- les mesures sont effectuées à intervalles courts de temps.
- Elle peut s'exprimer en termes de dispersion des résultats.

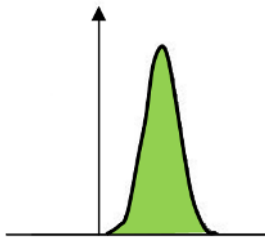


Figure 3.4

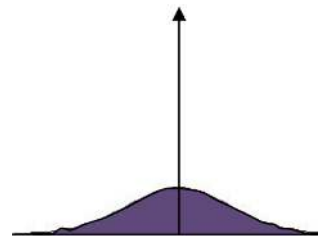


Figure 3.5

Fig 3.4. L'appareil de mesure est fidèle mais non juste : Les erreurs systématiques sont plus importantes, car les erreurs aléatoires sont faibles.

Fig 3.5. L'appareil de mesure est juste mais non fidèle : Les erreurs systématiques sont réduites mais les erreurs aléatoires sont importantes

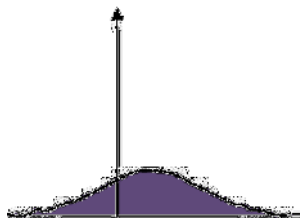


Figure 3.6

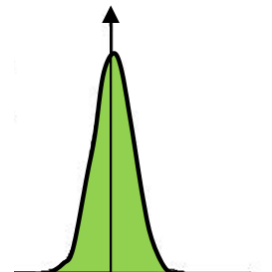


Figure. 3.7

Fig 3.6. L'appareil de mesure est ni juste, ni fidèle : Les erreurs systématiques et aléatoires sont plus élevées.

Fig 3.7. L'appareil de mesure est juste et fidèle donc précis : Les erreurs systématiques et aléatoires sont plus faibles.

3.3 Classification des incertitudes de mesure

3.3.1 Les incertitudes de mesures

On appelle incertitude de mesure ΔX , la limite supérieure de la valeur absolue de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte de la mesurande. En pratique on ne peut qu'estimer cette incertitude. On distingue deux types d'incertitudes :

- incertitude absolue ΔX , qui s'exprime en même unité que la grandeur mesurée.
- l'incertitude relative qui s'exprime généralement en pourcentage (%).

3.3.1.1 Erreur absolue, incertitude absolue

Soient :

- X : la valeur mesurée de la grandeur,
- X_e : la valeur théorique exacte de la même grandeur.

L'erreur absolue, notée δX , est l'écart qui existe entre la valeur mesurée et sa valeur théorique exacte exprimée avec la même unité.

$$\delta X = X - X_e \quad 3.1$$

Dans le cas où la valeur exacte de la grandeur à mesurer est inconnue, il faut évaluer une limite supérieure de l'erreur absolue qui n'est autre que l'incertitude absolue notée : $\Delta X = \sup(\delta X)$

3.3.1.2 Erreur relative, incertitude relative

L'erreur relative est le quotient de l'erreur absolue à la valeur exacte.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta X}{X_e} = \frac{X - X_e}{X_e} \quad 3.2$$

Comme il s'agit d'un nombre sans dimension (pas d'unité), on l'exprime généralement en pourcentage (%) :

$$\varepsilon_r \% = \frac{\delta X}{X_e} \times 100 = \frac{X - X_e}{X_e} \times 100 \quad 3.3$$

Egalement, si la valeur exacte de la grandeur est inaccessible, on prendra la limite supérieure de l'erreur relative qui n'est autre que l'incertitude relative : $\frac{\Delta X}{X_e}$

$$\frac{\Delta X}{X_e} \times 100 \quad 3.4$$

On peut l'exprimer en %

avec

$$X_e = X[\text{unité}] \pm \left(\frac{\Delta X}{X_e}\right) \% \quad 3.5$$

ou par unité

$$X_e = X \pm \Delta X[\text{unité}]$$

Exemple :

$$F = 15\text{N} \pm 5\% \quad \text{ou} \quad F = (15.0 \pm 0.5)$$

3.4 Classification des erreurs de mesure

Généralement, les erreurs sont classées en trois types, les erreurs brutes, les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires.

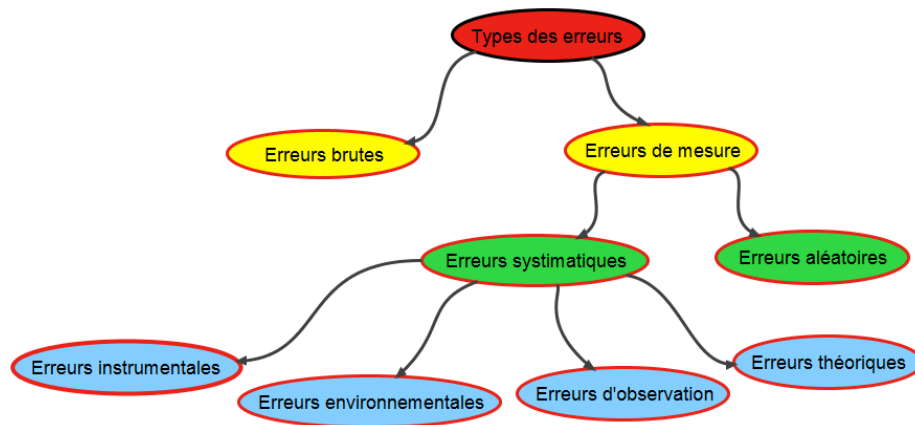


Figure 3.8. Les différents types d'erreurs

3.4.1 Erreurs brutes

Les erreurs grossières sont causées par une erreur dans l'utilisation d'instruments ou de compteurs, le calcul des mesures et l'enregistrement des résultats des données. Le meilleur exemple de ces erreurs est une personne ou un opérateur qui lit un manomètre de 1,01 N/m² à 1,10 N/m². Cela peut être dû à la mauvaise habitude de la personne de ne pas se souvenir correctement des données au moment de la lecture, de l'écriture et du calcul, puis de présenter les mauvaises données ultérieurement. Cela peut être la raison d'erreurs grossières dans les données déclarées, et ces erreurs peuvent se retrouver dans le calcul des résultats finaux, ce qui entraîne des écarts.

3.4.2 Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques qui se produisent en raison d'un défaut dans l'appareil de mesure sont appelées erreurs systématiques. Habituellement, ils sont appelés zéro erreur - une erreur positive ou négative. Ces erreurs peuvent être décelées en corrigeant le dispositif de mesure. Ces erreurs peuvent être classées en différentes catégories.

Les erreurs systématiques sont prévisibles et cette erreur sera présente pour toutes les lectures prises. Ce sont des erreurs reproductibles et vont toujours dans le même sens. Pour une expérience, les erreurs systématiques persisteront tout au long de l'expérience. Par exemple, une erreur systématique peut être due à un étalonnage imparfait d'un instrument ou bien, si nous utilisons une bande allongée en raison de l'utilisation, pour mesurer des longueurs, l'erreur sera la même pour toutes les mesures. En effet, une erreur due à une cause connue ou connaissable, elles ont pour causes. Les erreurs systématiques, elles peuvent provenir de : l'équipement de mesure, les méthodes d'observation et certains facteurs environnementaux.

Dans les mêmes conditions de mesure, ces erreurs auront la même ampleur et la même direction (positive ou négative). Comme les erreurs systématiques sont répétitives et ont tendance à s'accumuler dans une série de mesures, elles sont également appelées erreurs cumulatives.

Bien que certaines erreurs systématiques soient difficiles à détecter, l'enquêteur doit reconnaître les conditions qui provoquent de telles erreurs. La liste suivante comprend plusieurs exemples d'erreurs systématiques :

- Utilisation d'observations de température et/ou de pression incorrecte.
- Ne pas appliquer de constantes de courbure et de réfraction.
- Utilisation de hauteurs et/ou de hauteurs de cible incorrectes.
- Utilisation d'un décalage de prisme incorrect.
- Utilisation d'un instrument mal réglé.

L'effet de ces erreurs peut être minimisé par:

- Nivelier correctement l'instrument d'enquête et les cibles.
- Équilibrer les observations prospectives et rétrospectives.
- Saisie des facteurs de correction environnementale appropriés dans le collecteur de données.
- Saisie des hauteurs d'instrument, des hauteurs cibles et du décalage de prisme corrects dans le collecteur de données.
- Calibrer périodiquement l'équipement d'arpentage.

Si des corrections appropriées ne sont pas apportées, ces erreurs peuvent s'accumuler et provoquer des écarts importants entre les valeurs mesurées. En gardant l'équipement en bon état de fonctionnement et en suivant les procédures d'arpentage établies, de nombreuses erreurs systématiques peuvent être éliminées.

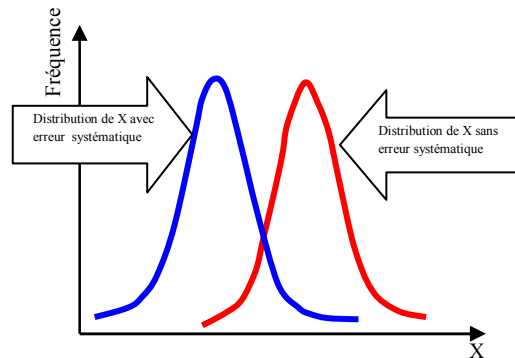


Figure 3.9. Erreur systématique[1]

Afin de comprendre le concept d'erreurs systématiques, classons les erreurs comme :

3.4.2.1 Erreurs instrumentales

Les erreurs instrumentales se produisent en raison d'une mauvaise construction des instruments de mesure. Ces erreurs peuvent se produire en raison d'une hystérésis ou d'une friction. Ces types d'erreurs incluent l'effet de chargement et la mauvaise utilisation des instruments. Afin de réduire les erreurs brutes de mesure, différents facteurs de correction doivent être appliqués et, dans les conditions extrêmes, l'instrument doit être recalibré avec soin.

3.4.2.2 Erreurs environnementales

Les erreurs environnementales se produisent en raison de certaines conditions externes de l'instrument. Les conditions externes comprennent principalement la pression, la température, l'humidité ou les champs magnétiques. Afin de réduire les erreurs environnementales, essayez de maintenir l'humidité et la température constantes dans le laboratoire en prenant certaines dispositions.

Assurez-vous qu'il ne doit y avoir aucun champ électrostatique ou magnétique externe autour de l'instrument.

3.4.2.3 Erreurs d'observation

Comme son nom l'indique, ces types d'erreurs se produisent en raison de fausses observations ou lectures dans les instruments, en particulier en cas de lecture de compteur d'énergie. Les fausses observations peuvent être dues à parallaxe. Afin de réduire l'erreur parallaxe, des compteurs très précis sont nécessaires : des compteurs munis d'échelles à miroir.

3.4.2.4 Erreurs théoriques

Les erreurs théoriques sont causées par la simplification du système de modèle. Par exemple, une théorie affirme que la température du système environnant ne changera pas les lectures prises alors qu'elle le fait réellement, alors ce facteur commencera une source d'erreur de mesure.

3.4.2.5 La valeur brut

Résultat d'un mesurage avant correction de l'erreur systématique. Ainsi, est une 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.

3.4.2.6 La valeur corrigé

La valeur corrigée est un résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique.

3.4.3 Erreurs aléatoires

C'est toute erreur qui n'obéit à aucune loi connue lorsqu'elle est prise sur un seul résultat. Ainsi, ces erreurs peuvent être réduites en prenant la moyenne d'un grand nombre de lectures.

Les erreurs aléatoires sont causées par le changement soudain des conditions expérimentales et le bruit et la fatigue des travailleurs. Ces erreurs sont soit positives soit négatives. Un exemple des erreurs aléatoires est lors de changements d'humidité, de changement inattendu de température et de fluctuations de tension.

Les sources probables de ce type d'erreur sont :

- Petites variations dans la position de fixation de la norme et pièce ;
- Léger déplacement des joints de levier dans la mesure instrument ;
- Frottement dans le système de mesure ;
- Erreurs de l'opérateur dans l'échelle de lecture.

Elle obéit aux lois de la statistique lorsque le nombre de résultats devient très grand.

Les erreurs aléatoires (ou accidentelles) ne sont pas directement liées aux conditions ou circonstances de l'observation. Pour une seule mesure ou une série de mesures, c'est l'erreur restant après l'élimination de toutes les erreurs et erreurs systématiques possibles.

Comme son nom l'indique, les erreurs aléatoires sont imprévisibles et sont souvent causées par des facteurs indépendants de la volonté de l'enquêteur. Leur occurrence, leur ampleur et leur direction (positive ou négative) ne peuvent être prédites. Les erreurs de ce type sont compensatrices et tendent à au moins s'annuler partiellement mathématiquement. Parce que l'amplitude est également une question de chance, ils resteront, dans une certaine mesure, dans chaque mesure.

Les divulgations (ou les résidus) correspondent à la différence entre une mesure ou une série de mesures et une valeur établie. Les erreurs aléatoires expliquent la mauvaise divulgation lorsque les erreurs systématiques ont été corrigées et les erreurs ont été supprimées.

Les erreurs de calcul sont calculées lors du réglage des boucles de niveau, des traversées et des réseaux GPS.

Les erreurs aléatoires sont conformes aux lois de probabilité et sont donc réparties de manière égale tout au long de l'enquête. En raison de leur nature aléatoire, les facteurs de correction ne peuvent pas être calculés et appliqués comme ils le sont avec certaines erreurs systématiques. Cependant, ils peuvent être estimés à l'aide d'une procédure basée sur les lois de probabilité connue sous le nom de méthode d'ajustement des moindres carrés. Cette méthode calcule les valeurs ajustées les plus probables et la précision de l'enquête. La méthode des moindres carrés peut également révéler la présence de grandes bévues.

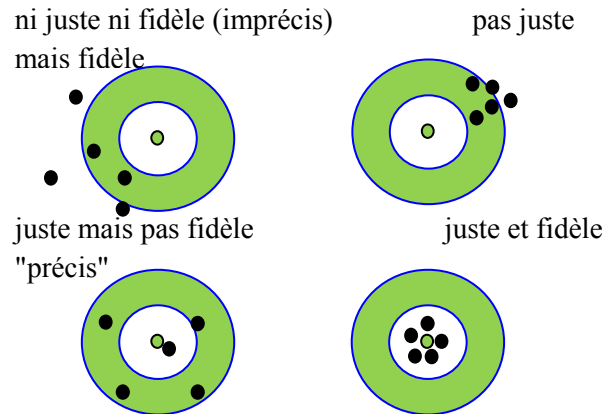


Figure 3.10. Représentation symbolique de l'erreur aléatoire et l'erreur systématique par les caractéristiques des appareils de mesure [2]

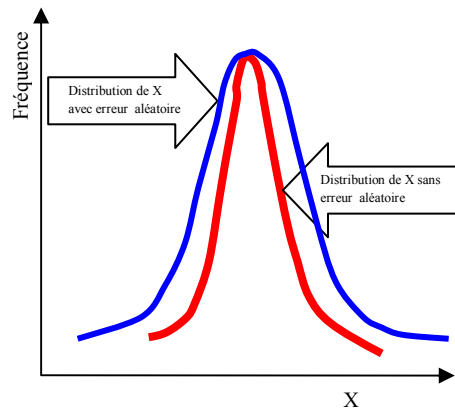


Figure 3.11. Erreur aléatoire [1]

Pour calcul les erreurs de mesure, il existe plusieurs façons de faire un calcul d'erreur de mesure raisonnable, comme l'estimation d'erreurs aléatoires et l'estimation d'erreurs systématiques.

3.5 Estimation des erreurs aléatoires

Il existe un certain nombre de façons de faire une estimation raisonnable de l'erreur aléatoire dans une mesure particulière. La meilleure façon est de faire une série de mesures d'une quantité donnée (disons, x) et de calculer l'écart moyen et l'écart type ($\overline{\Delta x}$ & σ) à partir de ces données. Dans la plupart des mesures, on peut estimer l'erreur due à des phénomènes aléatoires par une série de n mesures :

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$

La moyenne $\bar{x}$ est définie comme

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 3.6$$

Où, x_i est le résultat de la $i^{\text{ème}}$ mesure

« n » est le nombre de mesures

La variation standard est donnée par la relation suivante

$$\sigma_x = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2} \quad 3.7$$

pour calculer l'écart moyen d'un erreur aléatoire on obtient la relation

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \quad 3.8$$

Ecart quadratique moyen

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |(x_i - \bar{x})|^2} \quad \text{ou écart type:} \quad 3.9$$

Incertitude sur la moyenne:

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N |(x_i - \bar{x})|^2} \quad 3.10$$

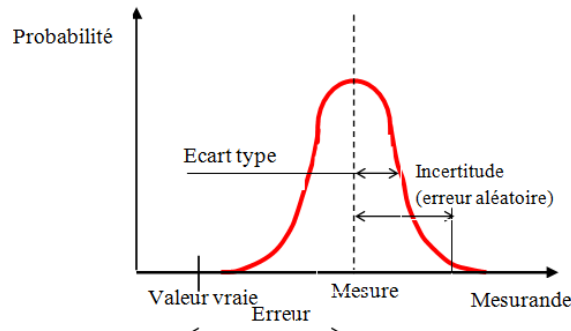


Figure 3.12. Estimation schématique de l'erreur aléatoire par la loi normale

3.6 Erreur parasite

C'est une erreur souvent grossière qui résulte d'une exécution incorrecte du mesurage. Par exemple, elle peut être due à une lecture fautive, ou à l'usage d'un instrument devenu défectueux, ou encore au mauvais emploi d'un instrument.

La classe de précision d'un appareil de mesure dépend des imprécisions de fabrication, de calibrage et de conception. Plus la fabrication est soignée, plus l'erreur est petite.

De plus l'erreur dépend du réglage de zéro électrique ou mécanique et de la courbe d'étalonnage de l'appareil.

3.7 Erreurs fortuites

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.

3.8 Erreurs systématique estimées

L'erreur systématique est la moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurage du même mesurande, effectués dans les conditions de respectabilité, moins une valeur vraie du mesurage.

L'erreur systématique est égale à l'erreur moins l'erreur aléatoire.

L'erreur systématique comprend des phénomènes comme l'erreur d'échantillonnage, l'erreur de préparation, l'erreur de lecture sur les appareils analogiques et l'erreur de parallaxe. Ces problèmes

peuvent introduire une dispersion statistique ou bien un décalage des résultats si l'erreur commise est toujours la même.

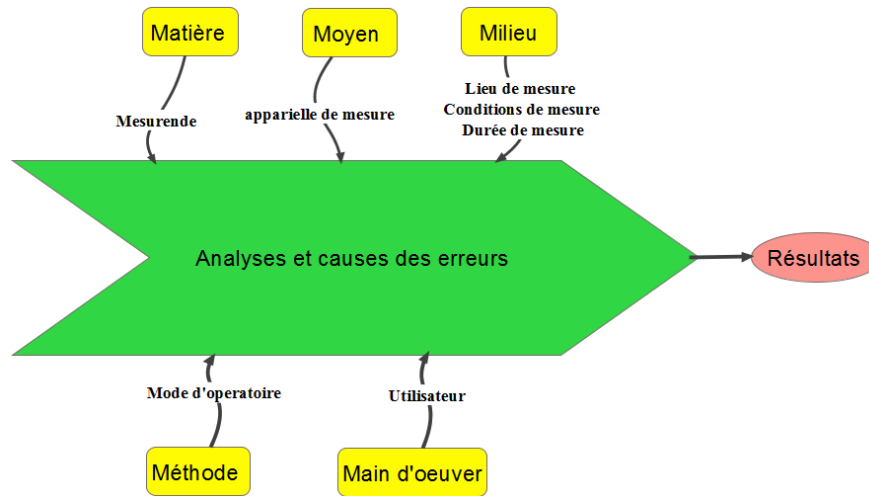


Figure 3.13. Analyses et causes des erreurs

3.9 Intervalle de confiance

Un intervalle de confiance, dans les statistiques, fait référence à la probabilité qu'un paramètre de population tombe entre deux valeurs définies pendant une certaine proportion de temps. Les intervalles de confiance mesurent le degré d'incertitude ou de certitude dans une méthode d'échantillonnage. Un intervalle de confiance peut prendre n'importe quel nombre de probabilités, la plus courante étant un niveau de confiance de 95% ou 99%.

3.10 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.

3.11 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.

3.12 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 (X) le résultat de la mesure, c'est à dire l'expression complète du résultat (un intervalle de valeurs).

Un mesurage n'étant jamais parfait, il y a toujours une erreur de mesure. L'erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Si la valeur de référence est la valeur vraie du mesurande, l'erreur est inconnue.

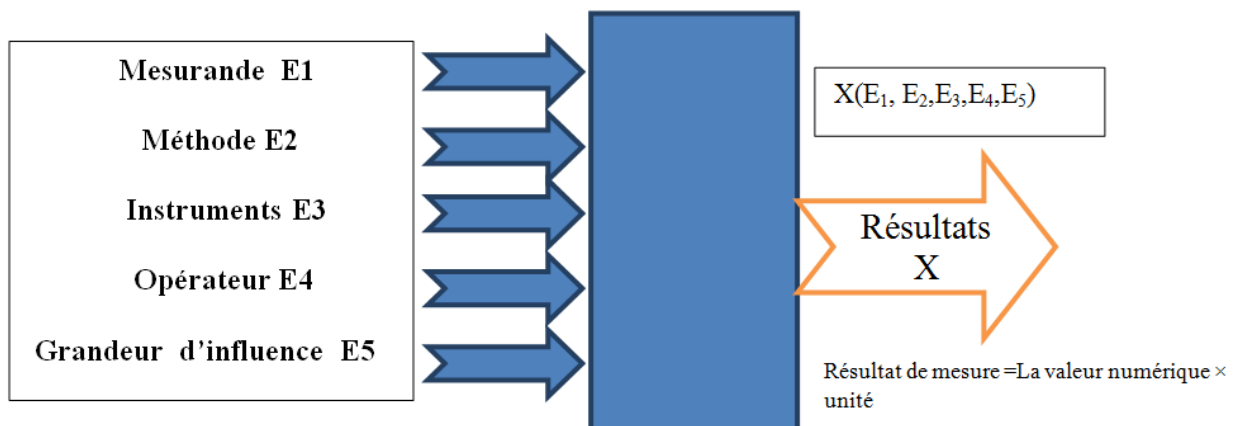


Figure 3.14. Résultats de mesurage complet

3.13 Identification et interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle

Utilisateur sera chargé de prendre des décisions :

- Acceptation ou refus d'un produit suite à l'établissement d'une conformité / 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 :

- en termes de protection des consommateurs L'information du consommateur de la quantité proposée par la réglementation de la déclaration du contenu (étiquetage).
- 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

3.14 Notions de base sur les calibres les jauges et les instruments de mesure simples

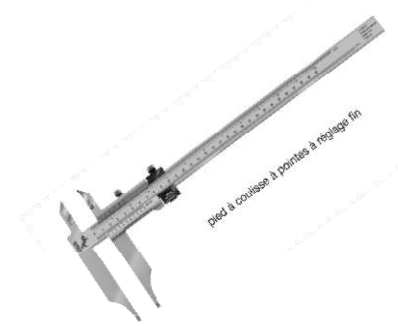
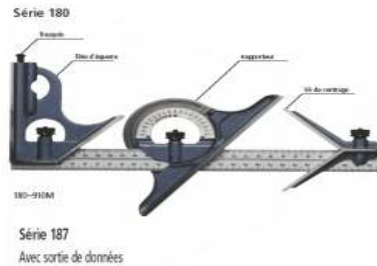
La plupart des moyens de contrôle que nous étudions et réalisons effectuent des mesures par comparaison par rapport à des étalons de cotes connues. Nous étudions, réalisons et certifions ces étalons standards et spéciaux.

Ceux-ci permettent d'étalonner ces moyens et de contrôle, si nous livrons deux étalons aux maxi et mini de la tolérance, l'amplification de la chaîne de mesure.

Ces étalons peuvent être fabriqués en acier traité de haute qualité, ou encore en acier HSS, en carbure de tungstène, et en céramique. Leur dureté est variable selon l'acier utilisé. De 59 à 64 HRC pour de l'acier trempé. Quant au revêtement, nous proposons du chrome, TIN, TICN et autres. Leurs micro dureté est également variable, de 940 HV pour le chrome à 2300 HV pour le TIN ou à 3300 HV pour le TiAlN. Nous sommes en mesure de fabriquer des jauges et calibres spéciaux. Nous les étudions à partir des dessins de la pièce à mesurer. Sur demande, chaque pièce de référence sera certifiée en laboratoire de métrologie et livrée dans un coffret avec son rapport de contrôle.

Chapitre 4

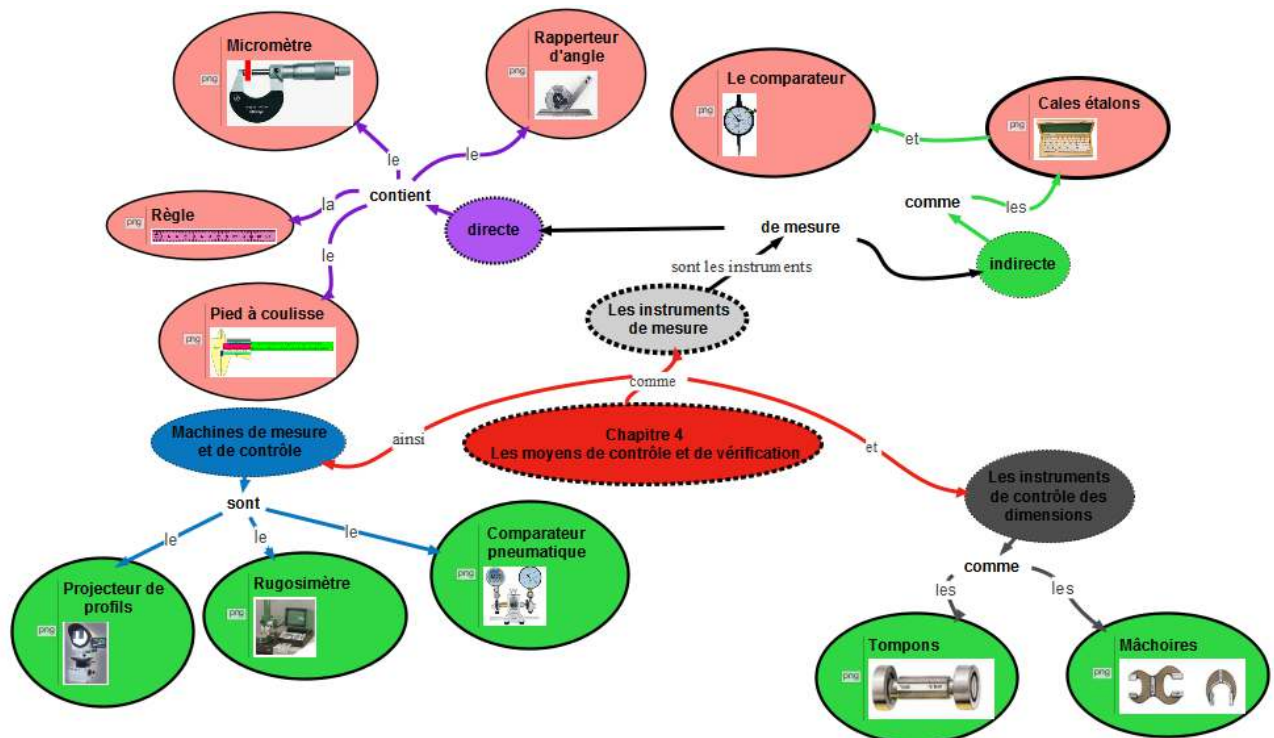
Les moyens de contrôle et de vérification



Objectifs

- À l'issue de ce chapitre, l'étudiant pourra :
- Gérer les moyens de contrôle et de mesures des dimensions des pièces mécaniques.
 - Comprendre la lecture par les instruments de mesure.
 - Démontrer les résultats de mesures.
 - Apprendre à l'étudiant les critères de précision des instruments de mesure.

Carte conceptuelle du chapitre 4



4 Les instruments de mesure et de contrôle

4.1 Introduction

Les instruments de mesure sont divisés en trois groupes : les instruments de mesure directe et indirecte, les machines de mesure et de contrôle et les instruments de contrôle des dimensions.

Les appareils de mesure sont divisés en appareils de mesure fixes et indicateurs.

Les enseignements incarnent soit la mesure, soit la mesure et la forme de l'objet à tester.

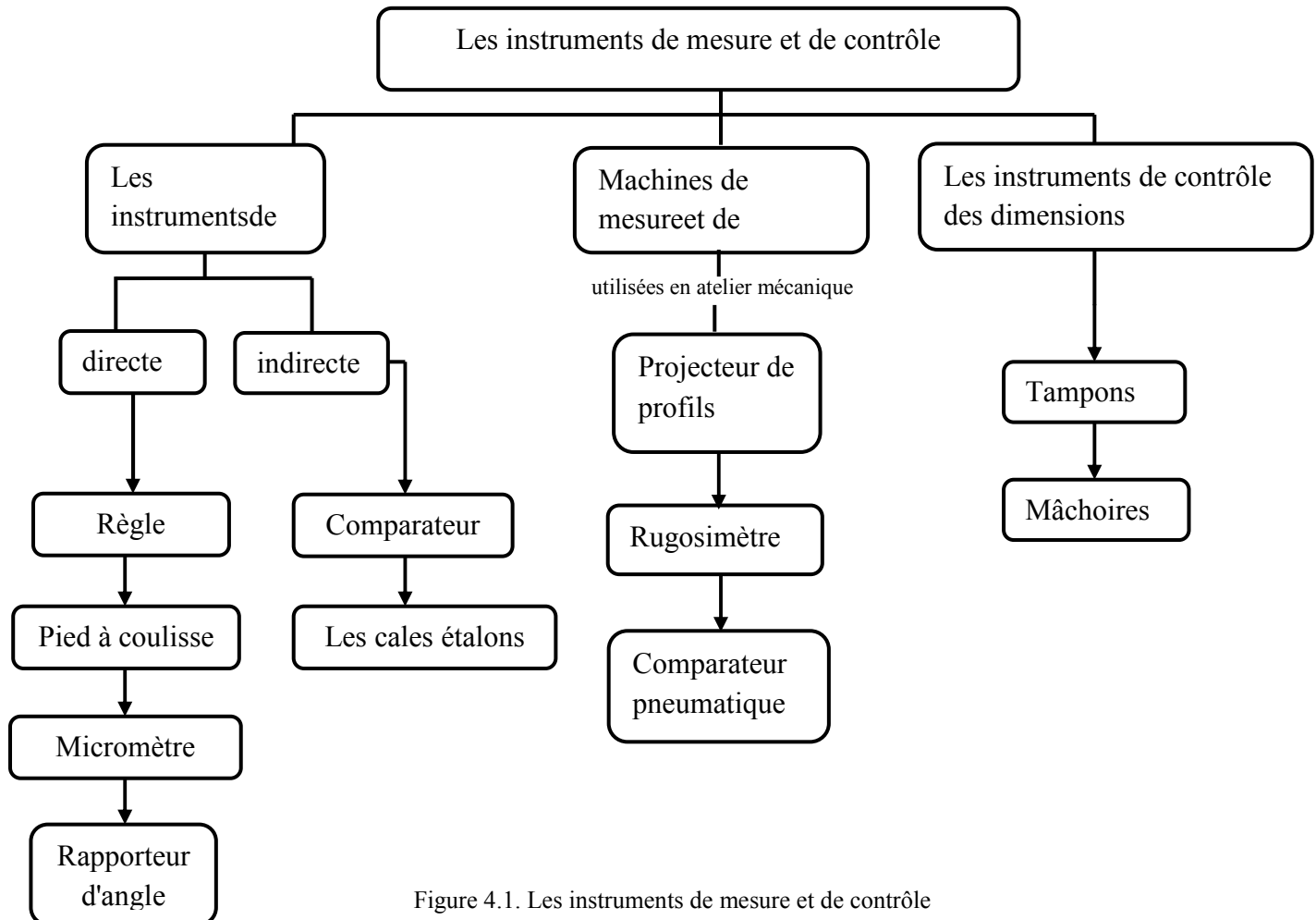


Figure 4.1. Les instruments de mesure et de contrôle

4.2 Mesure directe des longueurs et des angles

Il s'agit d'une méthode de mesure simple, permet de lire directement la valeur de mesure, dans laquelle la valeur de la quantité à mesurer est obtenue directement sans calculs par des instruments de mesure à des échelles, des verniers et aiguilles (règle, pied à coulisse, micromètre et le rapport d'angle).

Cette méthode est la plus utilisée en production. Cette méthode n'est pas très précise car cela dépend du jugement humain.

4.2.1 Règle

La règle est un outil de mesure de base à partir duquel de nombreux autres outils ont été développé. Les règles varient en taille de seulement un quart de pouce en longueur pour mesurer dans les rainures, évidements et clavettes à autant comme douze pieds de longueur pour les gros travaux. Les règles d'acier sont graduées en système anglais (pouces) ou métrique et parfois les échelles pour les deux systèmes sont fournies sur une seule règle. Ils

peuvent être gradués sur chaque bord des deux côtés et même sur les extrémités. Les diplômes d'anglais sont communément aussi fins qu'un centième (0,010) pouce en décimales ou un soixante-quatrième (1/64) pouce en fractions. Les graduations métriques sont généralement aussi fines qu'un demi-millimètre (0,5*0 mm). Les règles de *Starrett* sont graduées pour correspondre aux normes calibrées par le National Institute of standards et technologie (NIST).



Figure 4.2. Règle

4.2.2 Pied à coulisse

Est un instrument de mesure pour mesurer les longueurs, les diamètres interne et externe des objets plus précisément qu'une échelle ou une règle normale et peut indiquer la valeur entre les deux graduations d'une règle. Ainsi, est une instrument de mesure composé d'un cadre en (L) avec une échelle linéaire le long de son bras plus long et d'un accessoire coulissant en (L) avec une échelle vernier, utilisé pour lire directement la dimension d'un objet représentée par la séparation entre les bords intérieurs ou extérieurs, on distingue quelque types des pieds à coulisse.

4.2.2.1 Pied à coulisse à vernier

Le pied à coulisse à vernier ont des échelles doubles qui s'étendent le long du haut et du bas de l'étrier et affichent à la fois des mesures impériales et métriques. Le pied à coulisse est principalement utilisé pour les équipements de mesure de précision. Ils peuvent être utilisés pour faire des mesures à l'intérieur, à l'extérieur ou en profondeur, ce qui en fait un outil ingénieux.

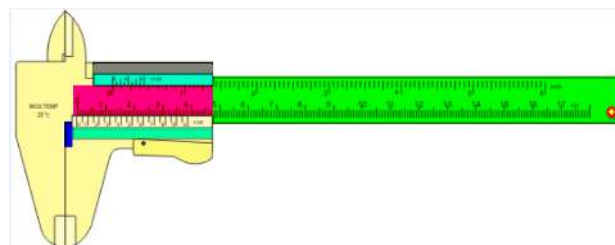


Figure 4.3. Pied à coulisse à vernier

4.2.2.2 Pied à coulisse à montre

Le pied à coulisse à montre possède un cadran qui affiche la mesure avec un indicateur de pointeur. La mesure obtenue est éventuellement cumulée avec la lecture obtenue mentionnée sur l'échelle passant le long du faisceau de l'étrier. Ainsi, une structure mécanique comprenant un système de mécanisme à crémaillère et pignon. Pour l'examiner, la valeur la plus notable est analysée à partir de la règle et de la lecture partielle du cadran. La bonne caractéristique des pieds à coulisse de cadran est qu'ils n'ont pas besoin de piles pour fonctionner. Même si les étriers à cadran ne sont pas résistants à l'eau, ils fonctionnent bien même si le temps est humide.

Les pieds à coulisse à cadran sont spécifiquement utilisés pour effectuer des mesures externes, des mesures internes, des mesures de pas et des mesures de profondeur.

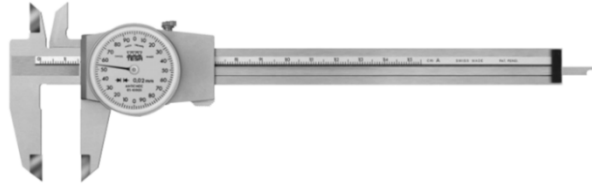


Figure 4.4. pied à coulisse digitale

4.2.2.3 Pied à coulisse numérique ou électronique

Les pieds à coulisse numériques sont la forme moderne des pieds à coulisse, dans lesquels l'échelle de vernier est remplacée par un codeur linéaire capacitif, qui mesure la distance en mesurant le changement de capacité du codeur. La lecture est ensuite affichée sur l'écran LCD fixé sur la balance. Les pieds à coulisse numériques sont la dernière innovation dans la technologie des pieds à coulisse. Au lieu d'un mécanisme à pignon et crémaillère, un microprocesseur interne calcule l'emplacement des mâchoires et affiche la lecture dans une petite fenêtre d'affichage. Les pieds à coulisse numériques ou électroniques sont des outils de mesure les plus avancés, qui peuvent donner des mesures très précises et extrêmement économiques. La lecture d'objets dans ces types d'étriers est facile par rapport à un pied à coulisse manuel.



Figure 4.5. Pied à coulisse digitale

4.2.2.4 Jauge de profondeur

Les jauges de profondeur est un instrument de mesure direct qui permet de mesurer les différents profondeurs et hauteur d'une pièce. Pour cela, il faut que le pied à coulisse dispose d'une jauge de profondeur se trouvant à l'extrémité de la règle graduée. Ex : mesurer la profondeur d'une rainure, alésage et la profondeur d'un trou.



Figure 4.6. Pied à coulisse de profondeur

4.2.2.5 Les composantes de pied à coulisse

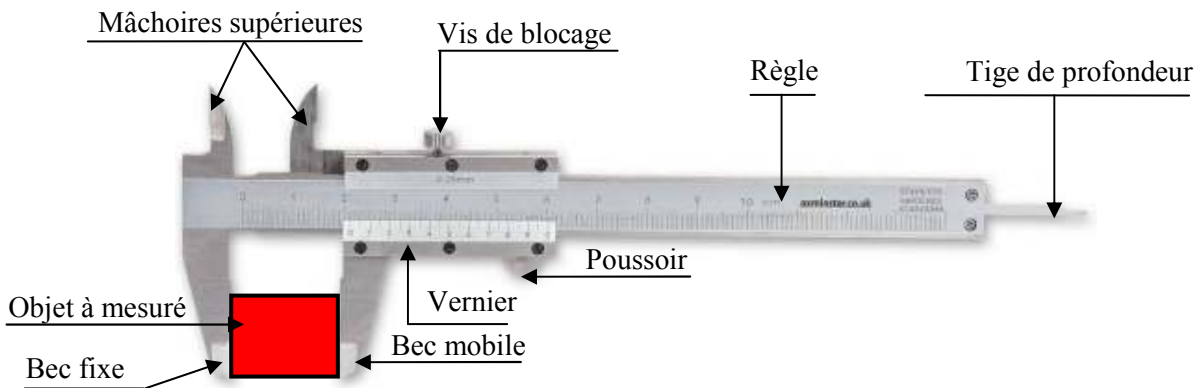


Figure 4.7. Les constitutions de pied à coulisse

4.2.2.6 Utilisation d'un pied à coulisse

Le pied à coulisse contient deux mâchoires, l'un fixe, l'autre coulissante. Déplacez la mâchoire coulissante en appuyant sur la pousse en bas. De nombreux étriers ont également une roue moletée qui facilite le déplacement de la mâchoire. Un pied à coulisse simple se compose de deux échelles graduées dont l'une peut glisser au-dessus de l'autre. L'échelle mobile est comme l'échelle vernier tandis que la grande échelle est l'échelle principale. Les échelles sont graduées en unités impériales et métriques dans la plupart des cas. L'échelle de vernier est chargée de fournir la valeur fractionnaire de la lecture de l'échelle principale.

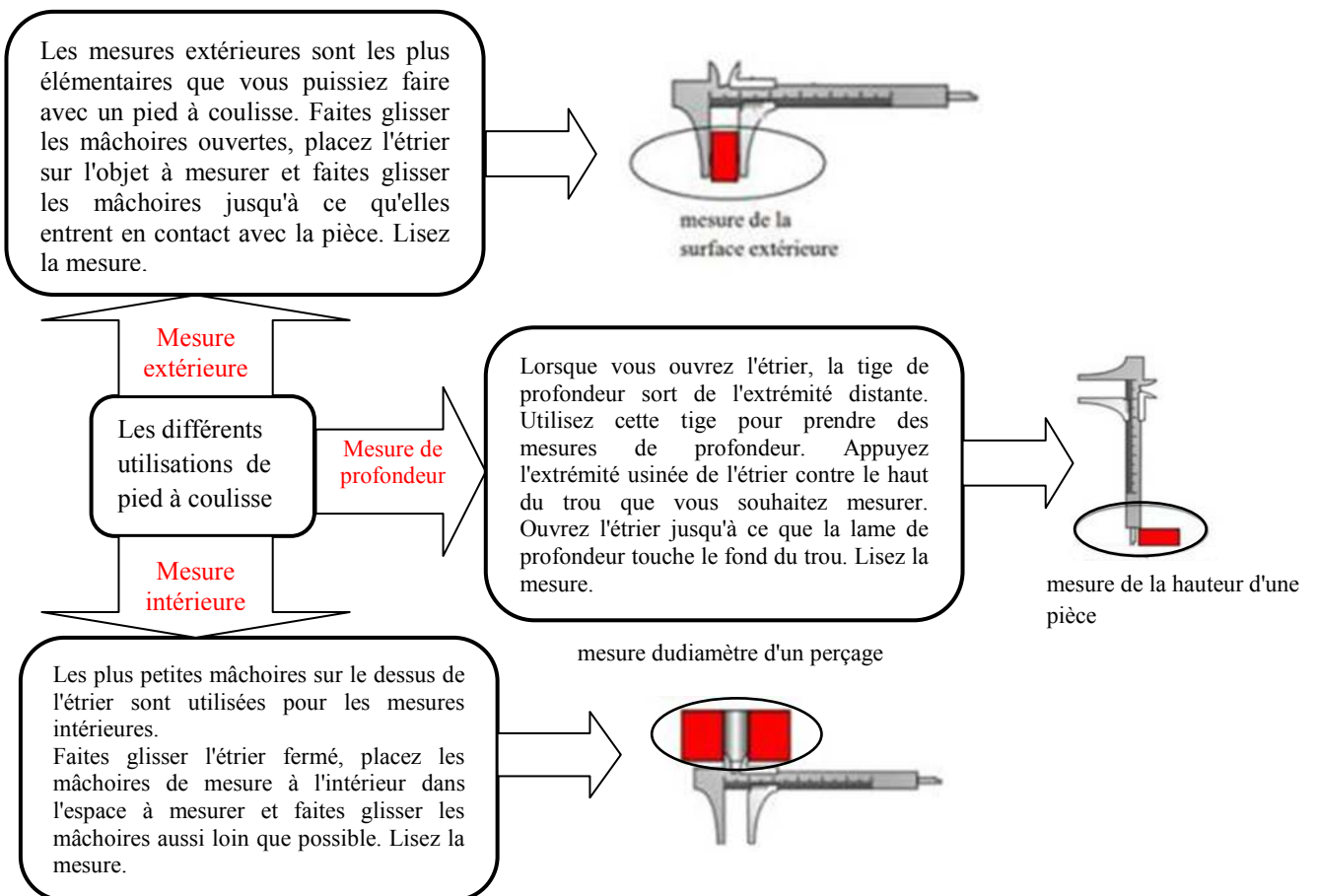


Figure 4.8. Les différentes utilisations de pied à coulisse

4.2.2.7 Précision de mesure

Deux spécifications de précision couvrent les caractéristiques métrologiques les plus importantes des pieds à coulisse.

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

Vernier	Graduations	1 Graduation égale	Précision du
1/10ème	10 Graduations	0.9mm	1/10ème=0.1mm
1/20ème	20 Graduations	0.95mm	1/20ème=0.05mm
1/50ème	50 Graduations	0.98mm	1/50ème=0.02mm

Tableau 2.1. La précision des verniers des pieds à coulisse

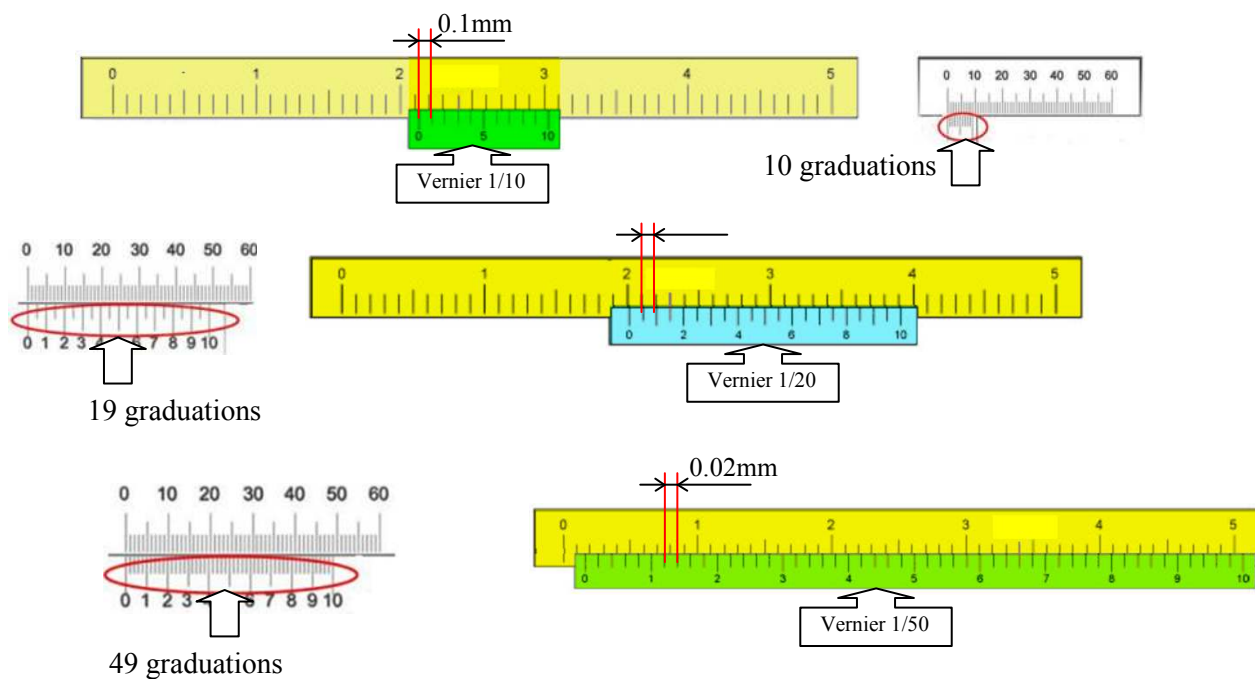
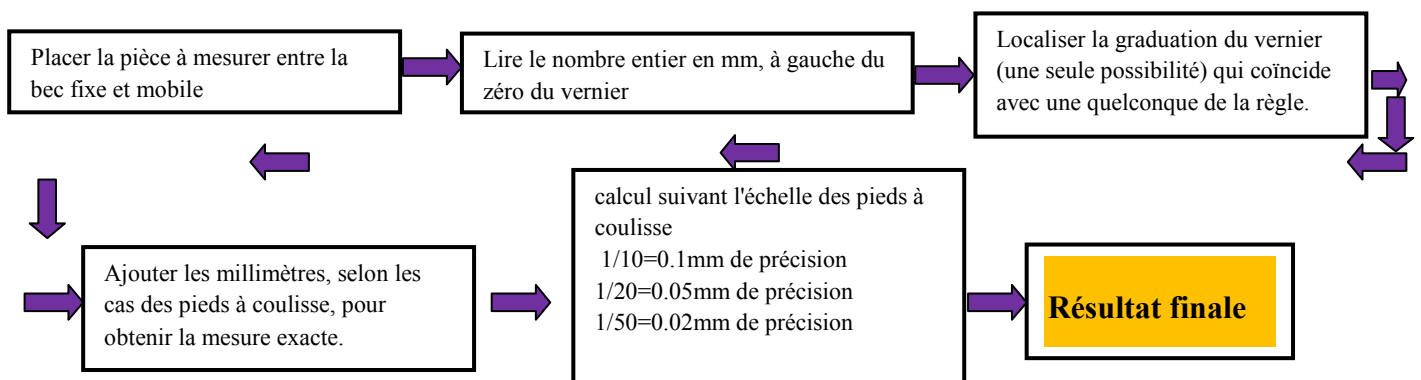


Figure 4.9. Les différents types de précision du vernier

4.2.2.8 Méthode de lecture



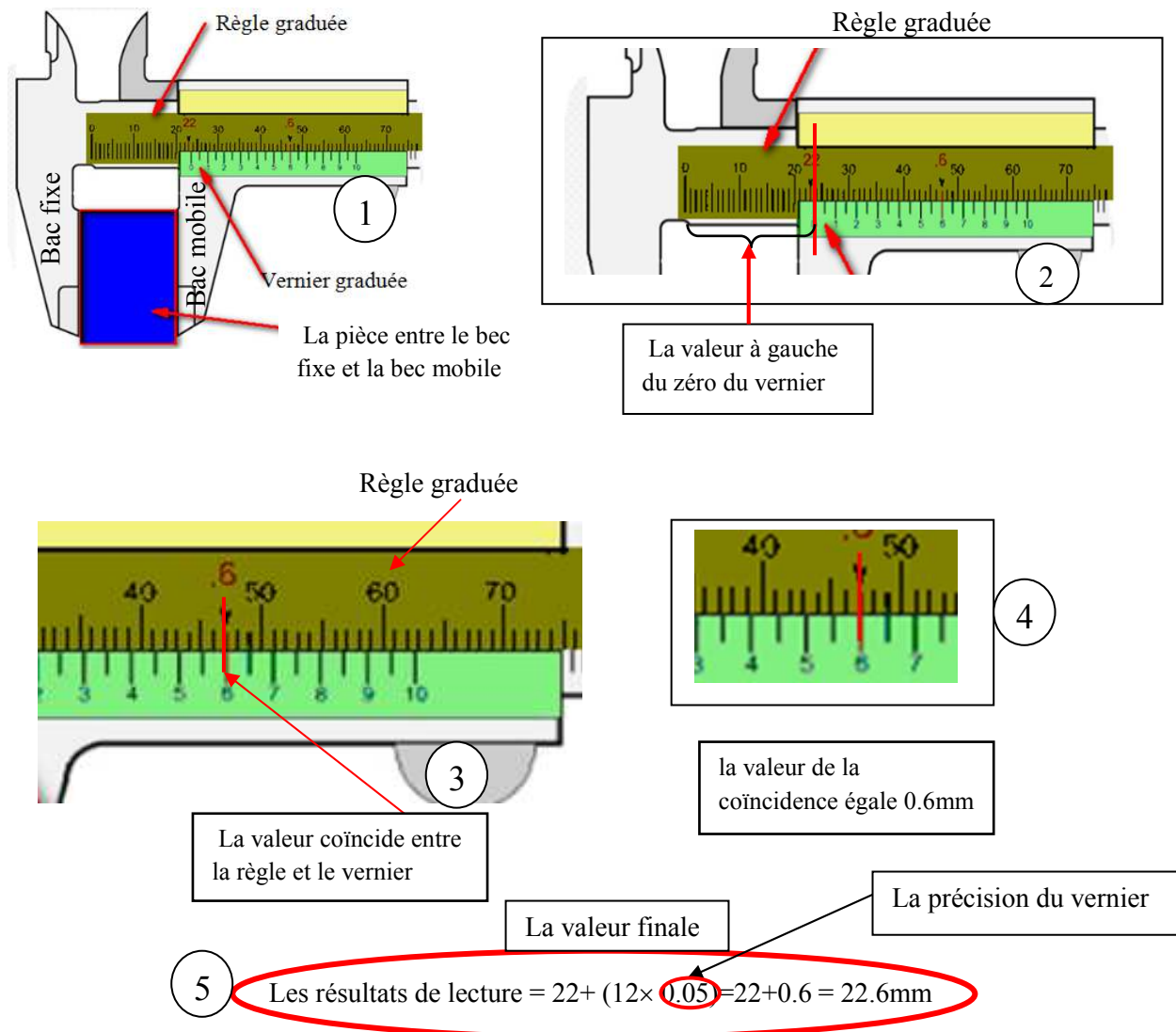


Figure 4.10. Explication de la méthode de lecture par le pied à coulisse à vernier

4.2.2.9 Exemples de mesure

- Pièce cylindrique

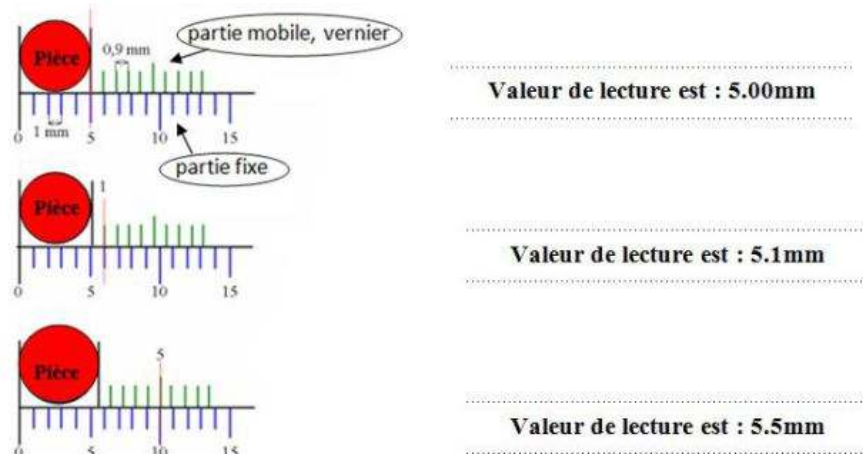


Figure 4.11. Exemple de lecture pour une pièce cylindrique

- Exemple de lecture par le pied à coulisse à montre

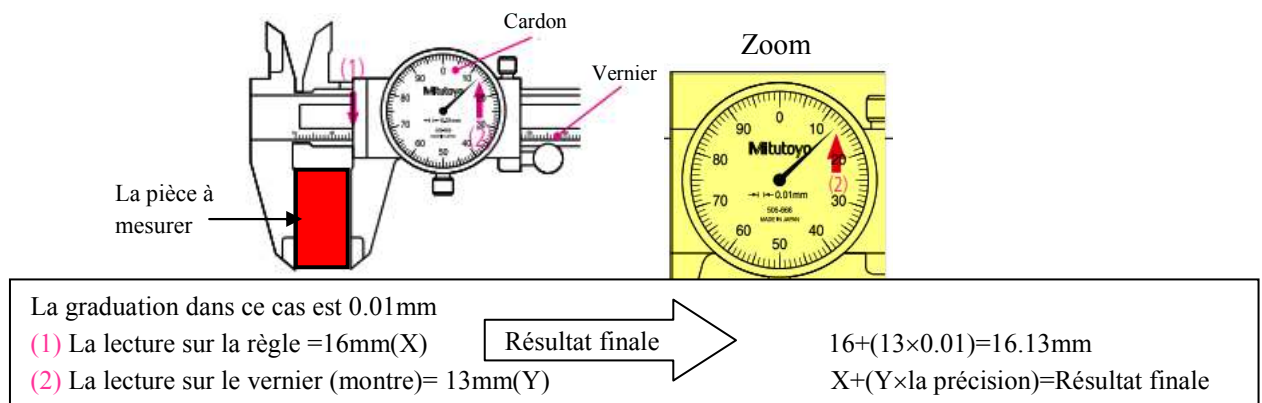


Figure 4.12. Exemple de lecture pour une pièce rectangulaire (pied à coulisse à cardon)

4.2.2.10 Exercices

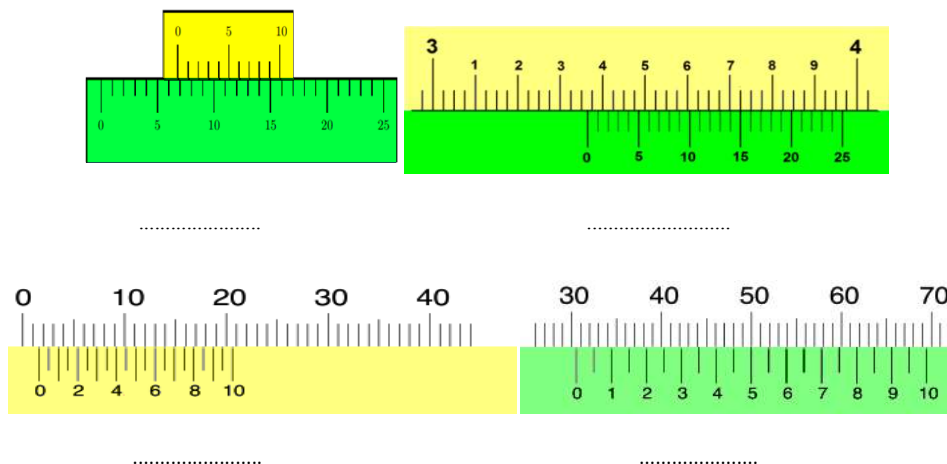


Figure 4.13. Exercices de lecture

4.2.3 Micromètre

Le micromètre est un instrument de mesure, il est très utilisé en mécanique pour mesurer les épaisseurs, les diamètres de portées cylindriques (micromètre d'extérieur) ou des diamètres de perçage ou d'alésage (micromètre d'intérieur) et hauteur d'une pièce. Ainsi, est un appareil de mesure le plus courant. Le micromètre est un appareil en forme de U avec broche filetée à une extrémité et une petite enclume sur l'autre.

En effet, un micromètre combine le double contact d'un pied à coulisse avec un réglage de vis de précision qui peut être lu avec une grande précision. Il fonctionne sur le principe qu'une vis faite avec précision avec un pas de quarante filetages au pouce avancera d'un quarantième (ou 0,025) de pouce à chaque tour. Dans le système métrique, le pas de la vis est de 0,5 mm. Chaque tour fera avancer la vis de 0,5 mm, il faudra donc 50 tours pour compléter la plage normale de 25 mm. Il existe trois types de micromètre, communément appelés micromètres ou simplement micros, utilisés en mécanique : le micromètre à palmer, le micromètre digitale et le micromètre de profondeur pour faire des mesures extérieures, intérieures et profondeur des pièces cylindrique ou rectangulaire.

4.2.3.1 Micromètre à palmer

Un micromètre à Palmer, est un instrument de mesure largement utilisé pour mesurer des petites dimensions. Dont le fonctionnement est basé sur la vis micrométrique, et qui sert à mesurer les dimensions d'un objet avec un degré de précision supérieur, de l'ordre des centièmes de millimètres (0,01 mm) et de millièmes de millimètres (0,001 mm). Il existe différents types, selon la mesure requise.

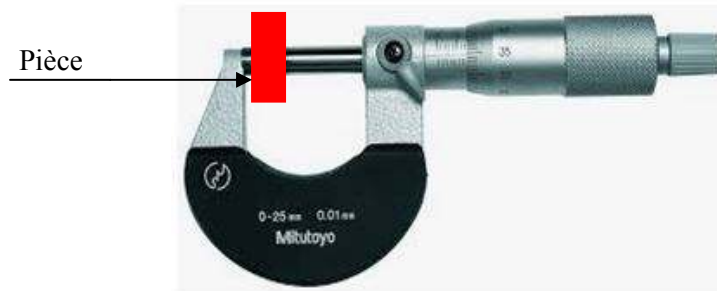


Figure 4.14. Micromètre à palmer

4.2.3.2 Micromètre numérique (digitale)

Le micromètre numérique est un instrument portable pour mesurer les longueurs entre ses deux contacts de mesure. Le système de mesure est direct et se compose d'un corps à butée fixe et mobile muni d'une tête micrométrique. L'exécution de la mesure entraîne la longueur d'un élément. La résolution des micromètres numériques est généralement de 0,01 mm, bien que des résolutions de 0,005 ou 0,001 mm soient disponibles sur une base utilisateur. Ces instruments de mesure sont généralement des instruments largement utilisés dans les mesures industrielles car leur rapport prix/qualité métrologique est généralement très bon. Les micromètres avec lecture numérique qui fournit des lectures directes utilisent un compteur mécanique ou électronique. Les micromètres électroniques détectent le déplacement de la broche d'un codeur rotatif et fournissent une lecture avec une résolution de 0,001 mm.

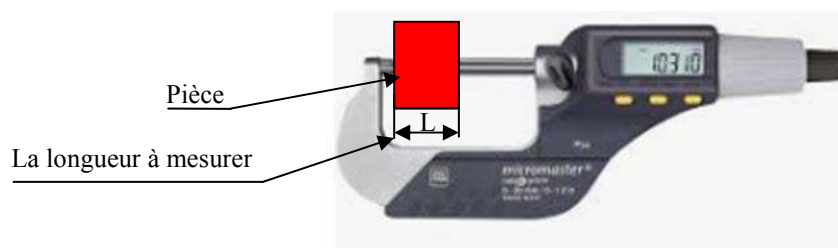


Figure 4.15. Micromètre digitale

4.2.3.3 Micromètres à cadran

Le micromètre à montre possède un cadran qui affiche la mesure avec un indicateur de pointeur. Lecture sur le tambour est 0,01mm, surfaces de contact en métal dur. Particulièrement adapté pour des mesures en série précises, par exemple, lors du broyage des vagues

- Lecture 1 μm sur le pointeur de précision, 5 μm sur la partie micromètre ;
- Fonctionnement confortable du levier, force de mesure constante ;
- Enclume précise avec course de 2,5 mm, Parallélisme des surfaces de mesure $\leq 1 \mu\text{m}$;

- Pas de filetage 0,5 mm ;
- Broche Ø 8 mm, surfaces de mesure en métal dur.

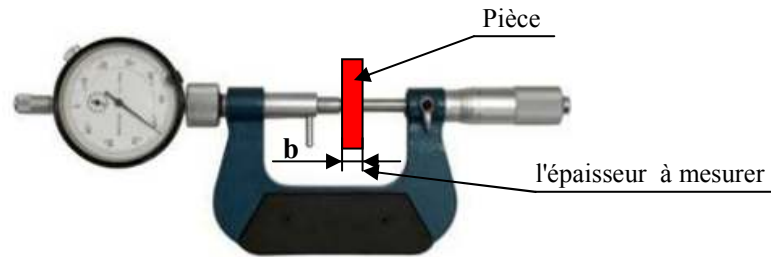


Figure 4.16. Micromètre à cadran

4.2.3.4 Micromètres de profondeur

Le micromètre de profondeur est un instrument de mesure pour mesurer la profondeur des trous, des rainures et des marches. Les micromètres de profondeur sont classés comme suit :

1. Type de tige simple ;
2. Tige interchangeable type ;
3. Type de tige sectionnée.

Parmi les trois types des tiges, la tige interchangeable est la plus utilisée le micromètre simple de profondeur de tige ce micromètre se compose d'une tête micrométrique, d'une broche et d'une base. La construction du cylindre et du tambour est la même que celle du micromètre extérieur normal, mais les graduations sont données dans le sens inverse. La plage de mesure typique (course de la broche) est de 25 mm.

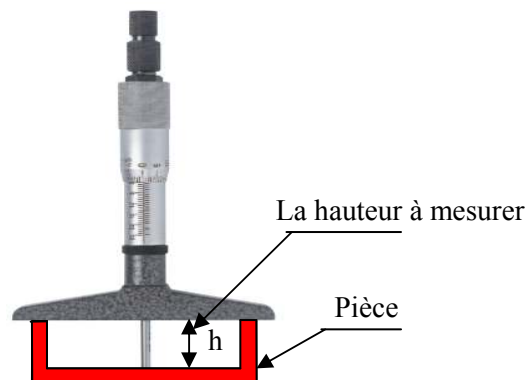


Figure 4.17. Micromètre de profondeur

Remarque : L'équipement de mesure de précision (PME) tel que le micromètre est régulièrement calibré pour la précision. Assurez-vous qu'un micromètre a été étalonné avant utilisation.

4.2.3.5 Les composantes du micromètre

Les micromètres sont des appareils utilisés pour mesurer de très petites distances, généralement au 1/1000 mm. Ils sont largement utilisés en génie mécanique pour mesurer avec précision l'épaisseur des blocs, les diamètres extérieur et intérieur des arbres et les profondeurs.

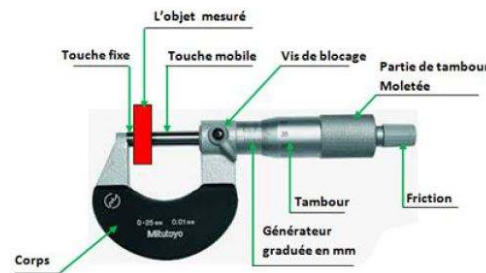


Figure 4.18. Constitutions du micromètre

4.2.3.6 Méthode d'utilisation

L'opérateur tourne la broche progressivement avancer son extrémité vers l'enclume du côté opposé et fermer sur la partie.

Le micromètre typique n'a qu'une plage d'un pouce (25,4 mm), comme illustré ci-dessus. Par conséquent, vous besoin de différents micromètres pour mesurer les distances entre 0 et 1 pouces, 1 et 2 pouces, etc.

Un micromètre offre un équilibre entre polyvalence et précision. Un micromètre manuel ordinaire a une sensibilité cela équivaut à des pieds à coulisse numériques (0,001). Micromètres manuels avec une échelle de Vernier offrent une sensibilité de 0,0001 pouces.

Ainsi, est un outil utilisé pour la mesure précise de très petits objets. Un micromètre peut mesurer la profondeur, la longueur et l'épaisseur de tout objet entre son enclume et sa broche. Il est couramment utilisé dans les applications de génie mécanique et d'usinage.

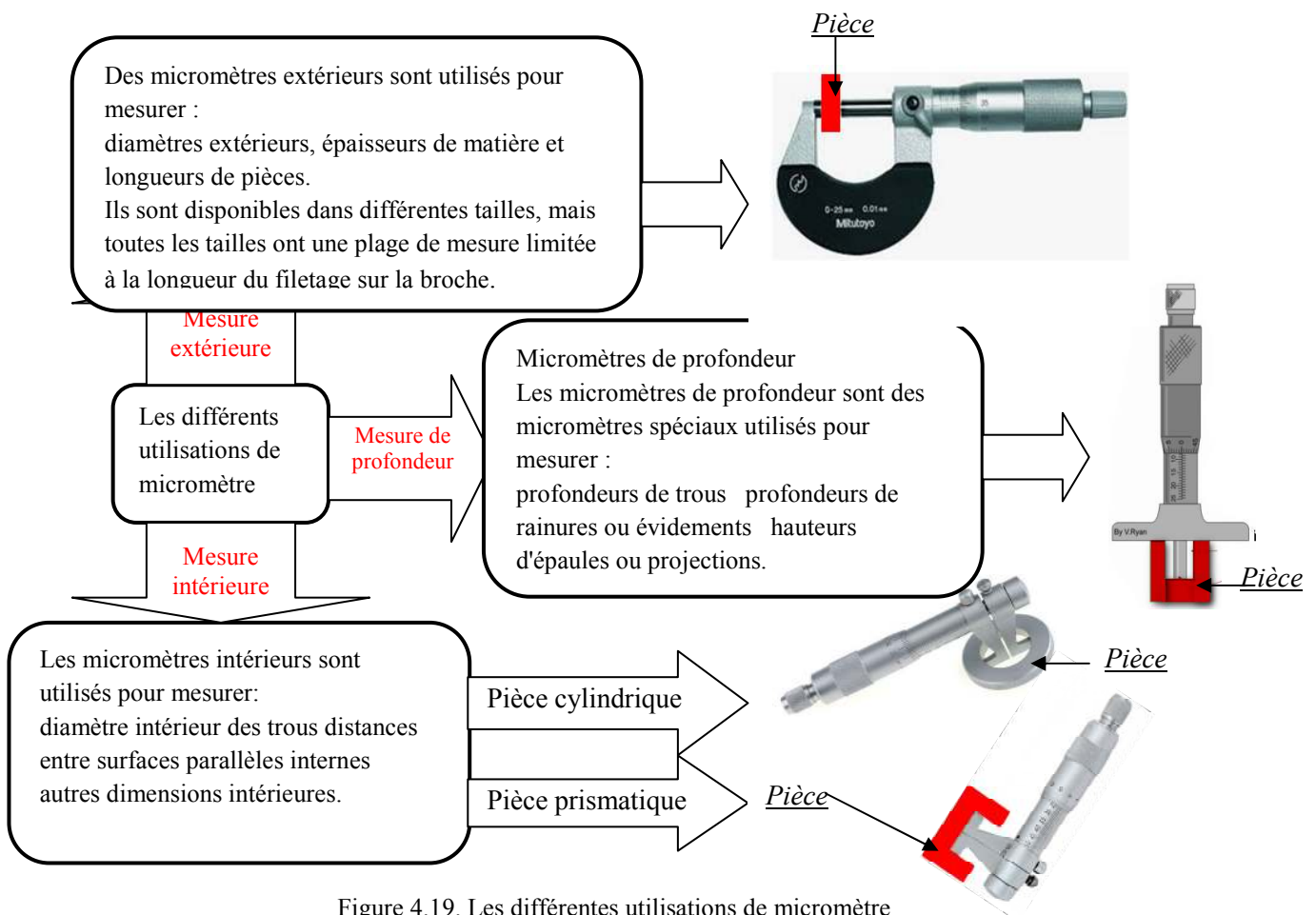


Figure 4.19. Les différentes utilisations de micromètre

4.2.3.7 La précision des micromètres

On distingue plusieurs précisions de micromètre, selon leur construction, peuvent atteindre des degrés élevés précision, comme :

- centièmes ou millièmes de mm (0,01 mm ou 0,001 mm).
 - centièmes ou millièmes de pouces (0,01 "ou 0,001"). 0,01 mm 0,001 mm 0,001 "
- 1 mm divisé en mille parties, dit 1 micron ou micron (1 μ)



Figure 4.20. Trois exemples concernant la précision

4.2.3.8 Méthode de Lecture

Toutes les vis micrométriques utilisées dans le système métrique ont une longueur de 25 mm, avec un pas de filetage de 0,5 mm, de sorte qu'en faisant tourner le tambour d'un tour complet, la sonde avance ou recule de 0,5 mm.

Le micromètre a une échelle longitudinale, une ligne longitudinale qui sert de fidèle, qui dans sa partie supérieure présente les divisions de millimètres entiers et dans la partie inférieure celles des médias millimètres, lorsque le tambour tourne, il montre ces divisions.

Sur la surface du tambour, 50 divisions égales ont été gravées sur toute sa circonférence, indiquant la fraction de tour qu'il a effectuée. Une division est égale à 0,01 mm.

Pour faire une lecture, on regarde l'échelle longitudinale, connaissant ainsi la mesure avec une appréciation de 0,5 mm, l'excès par rapport à cette mesure est vu sur l'échelle du tambour avec une précision de 0,01 mm.

Dans le schéma ci- dessous vous pouvez voir la méthode de lecture sur un micromètre à palmer.

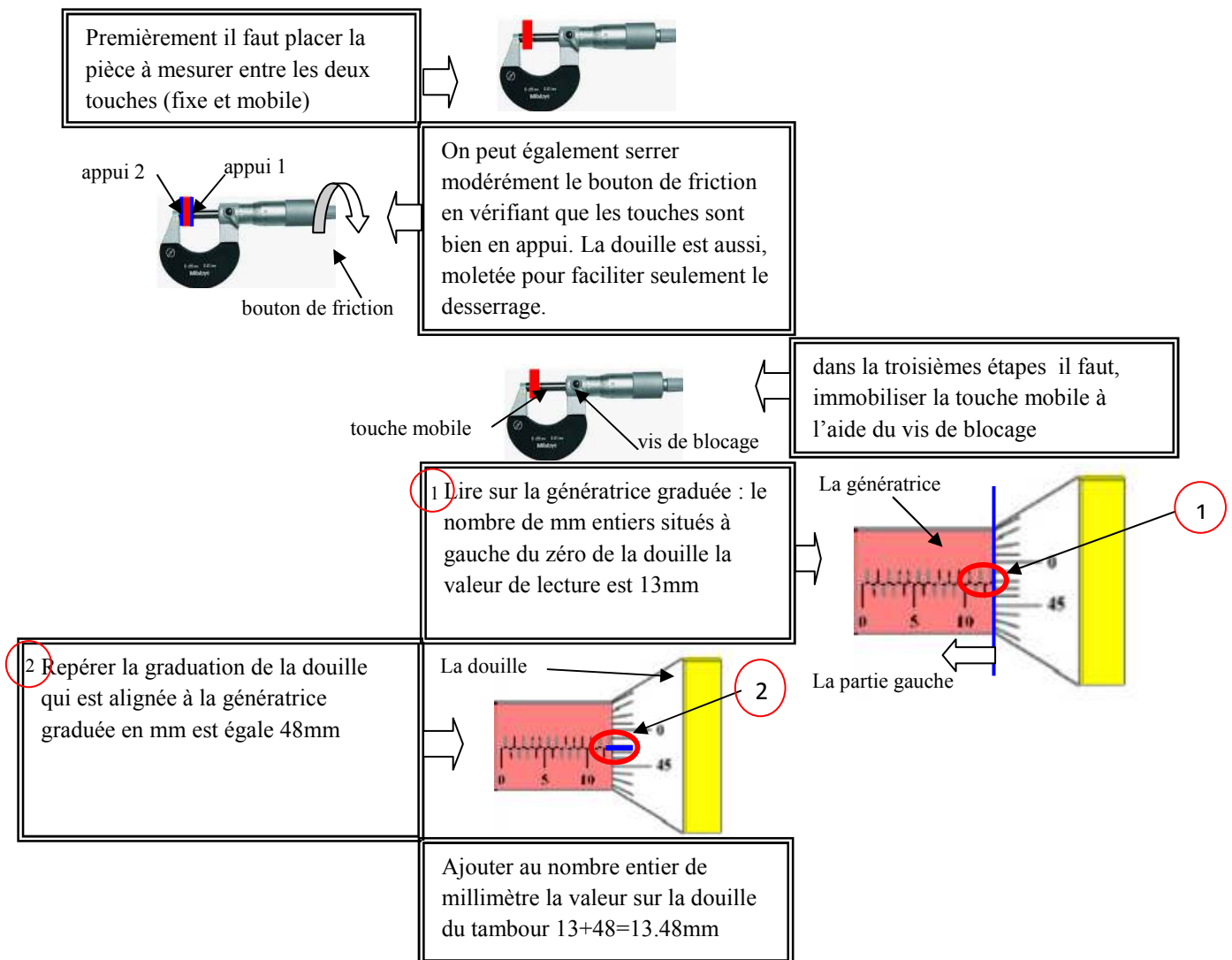
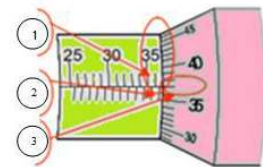
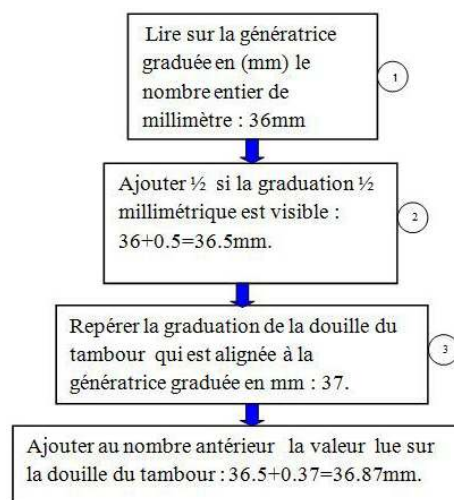


Figure 4.21. Méthode de lecture par le micromètre

4.2.3.9 Exemple de lecture



4.2.3.10 Exercice

Lire les valeurs de mesure sur les différents exemples de micromètre donné ci- dessous

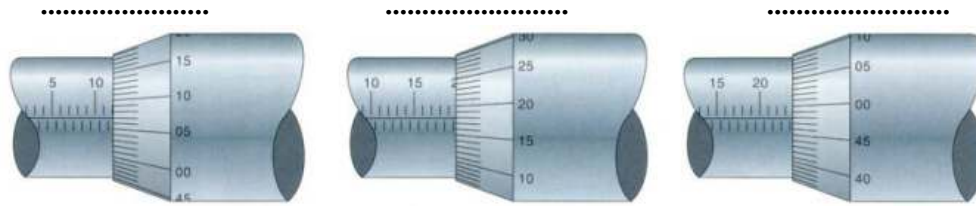


Figure 4.22. Exercices

4.2.4 Rapporteur d'angle

Le rapporteur d'angle est un outil utilisé pour mesurer les angles. Ainsi, est un instrument de mesure qui permet de mesurer la position d'un angle entre deux surfaces.

La lame coulissante est reliée à une échelle de Vernier, l'échelle principale est divisée en degrés de 0 à 90 dans chaque sens.



Figure 4.23. Rapporteur d'angle

Chaque graduation représente 1°. On peut mesurer de 0° jusqu'à 180°.

4.2.4.1 Les composants du rapporteur d'angle

Le rapporteur se compose d'un cadran gradué avec une lame coulissante droite (règle) qui peut être pivotée à n'importe quel angle puis verrouillée en position avec les deux vis de verrouillage. Le cadran est gradué à 360°, lecture 0-90°, 90°-0°, 0-90°, 90°-0°. Chaque dix degrés est numéroté, et chaque cinq degrés est indiqué par une ligne plus longue que celles de chaque côté. La plaque Vernier est graduée de sorte que 12 espaces sur la plaque occupent le même espace que 23 espaces sur le disque du rapporteur.

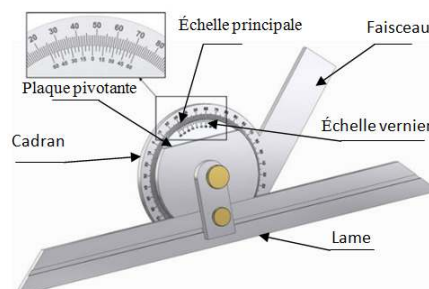


Figure 4.24. Constitutions du rapporteur

La lame coulissante est reliée à une échelle Vernier, l'échelle principale est divisée en degrés de 0 à 90 dans chaque sens. Plage $4 \times 0-90$.

Sensibilité = 5min

Degré ($^{\circ}$) = 60 min ($'60$)

Minute ($'$) = 60 secondes ($''60$)

Degré ($^{\circ}$) = 3600 secondes ($''60$)

4.2.4.2 Lecture du rapporteur d'angle

- 1) C'est un instrument de mesure angulaire capable de mesurer les angles à moins de 5 min
- 2) Le nom universel fait référence à la capacité de l'instrument à s'adapter à une grande variété de configurations de travail et d'interrelations angulaires.

4.2.4.3 Exemple de mesure

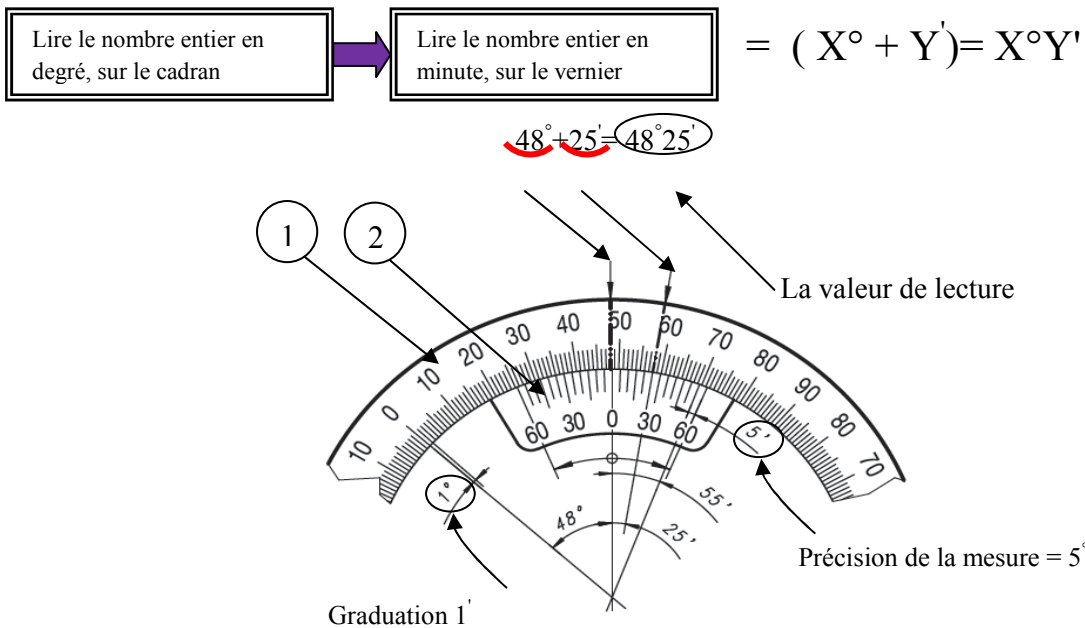


Figure 4. 25. Exemple de mesure

4.2.4.4 Exercices

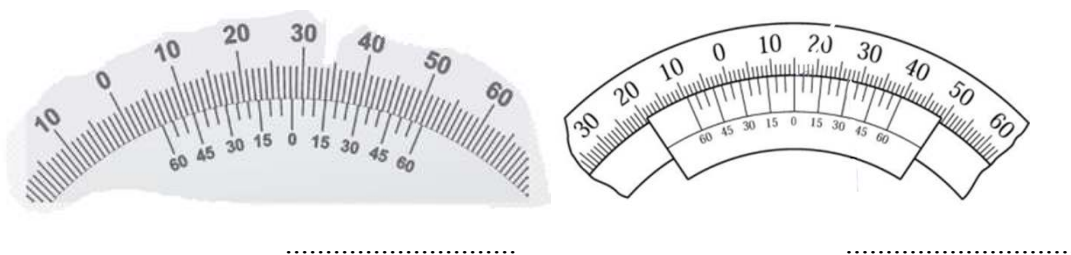


Figure 4. 26. Exercices

4.3 Mesure indirecte

Avec des mesures indirectes, les dimensions sont mesurées à l'aide d'instruments de mesure tels que des comparateurs à cadran qui examinent la différence entre des cibles et des dispositifs de référence tels que des blocs de jauge et des jauges à anneau. Ces mesures sont

également appelées mesures comparatives, car une comparaison est effectuée à l'aide d'un objet aux dimensions standard. Plus la forme et les dimensions d'un appareil de référence sont prédéterminées, plus la mesure devient facile. Cependant, cette méthode présente également l'inconvénient de limiter la plage de mesure.

4.3.1 Comparateur

Le comparateur est un instrument de mesure, qui permet de mesurer les déviations indirecte par comparaison. Ces instruments de mesure sont basés sur deux types essentiels, l'un est le comparateur à cadran, et l'autre type est le comparateur digital.

4.3.2 Types de comparateur

4.3.2.1 Comparateur à cadran

Comparateur à cadran le plus simple. C'est un instrument très polyvalent et sensible. Il utilise un système d'engrenage avec une crémaillère et un pignon. L'indicateur de cadran se compose d'un piston qui peut monter ou descendre en déplaçant l'aiguille du cadran dans le sens horaire ou antihoraire direction. Le cadran plus petit indique le nombre de tours complets de la grande aiguille.

Les indicateurs à cadran ont une plage de course limitée (celle de la figure 4.27) a une course de 0 à 3 mm) et une discrimination de 0,01 mm ou généralement de 0,001" pour les indicateurs à base de pouce.

Assurez-vous que l'axe du piston est toujours perpendiculaire à la surface à évaluer, sinon une erreur de mesure être engagé.

Les indicateurs à cadran montrent l'écart entre une dimension et une dimension «vraie».

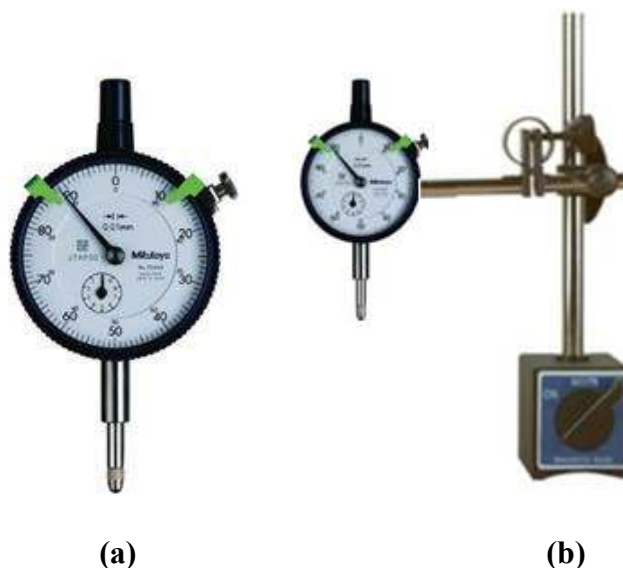


Figure 4.27. Comparateur: (a) à montre et (b) comparateur à cadran monté sur un support

La figure.4.27(b) montre un comparateur à cadran monté sur un support typique, qui à son tour est placé sur une surface rigide. Un échantillon de référence (maître) de hauteur

exactement connue est ensuite placé sous le piston et la lunette est tournée de sorte que l'instrument indique exactement zéro ; assurez-vous que le plongeur peut toujours se déplacer dans les deux directions et qu'il n'est pas «abaissé» dans une direction. L'instrument est maintenant configuré pour comparer un spécimen à la hauteur «calibrée». L'instrument indiquera l'écart de cette dimension par rapport à l'étalon «calibré».

4.3.2.2 Comparateur digitale

L'avancée des technologies a réduit les comparateurs électriques et électroniques au fil du temps. Les indicateurs sont souvent appelés ; Indicateurs de test à cadran / numérique (DTI), indicateurs de test de bras de levier ou indicateurs de doigt. Il existe deux types principaux - levier et piston. Les indicateurs sont utilisés pour diverses tâches telles que la mesure du faux-rond et de la planéité, ainsi que pour effectuer des mesures comparatives. Ils sont également utilisés pour mettre en place des pièces sur des machines-outils. Les indicateurs effectuent principalement de petites mesures, de moins de 1 mm à environ 200 mm avec des graduations de max 0,01 mm.



Figure 4.28. Comparateur digitale

4.3.3 Composantes d'un comparateur

- La grande aiguille, commandée par le palpeur fait un tour pour une différence de cote de 1 mm.
 - Le grand cadran est divisé en 100 parties égales, il est donc possible d'apprécier le 1/100^{ième} de mm.
 - Le petit cadran (totaliseur) indique le nombre de tours de la grande aiguille.
 - L'ensemble de la grande graduation (lunette) peut tourner autour de l'axe de la montre, afin que la division "zéro" puisse être mise à volonté devant l'aiguille centrale.
- Il existe également des comparateurs à cadran permettant d'apprécier le 1/1000^{ième} de mm.



Figure 4.29. Composantes d'un comparateur

4.3.4 Méthode de lecture

Généralement pour effectuer des mesures par comparaison. Ainsi, la différence entre les dimensions de l'élément de référence et du mesurande est mesurée par le petit déplacement différentiel que la sonde de l'instrument détecte en palpant successivement sur les deux. La méthode de mesure de base pourrait être décrite comme suit (voir figure 4.30 et la figure 4.31):

- Le comparateur, fixé sur un support approprié qui à son tour est pris en charge sur une table de planéité ou une autre surface de référence est placée "A zéro" sur un élément de référence de dimension connue h_0 (généralement un motif).
- L'élément de référence est supprimé et la pièce est remplacée à sa place dont vous voulez mesurer la dimension, notez la lecture α fourni par le comparateur.
- La dimension de la pièce est $h = h_0 + \alpha$

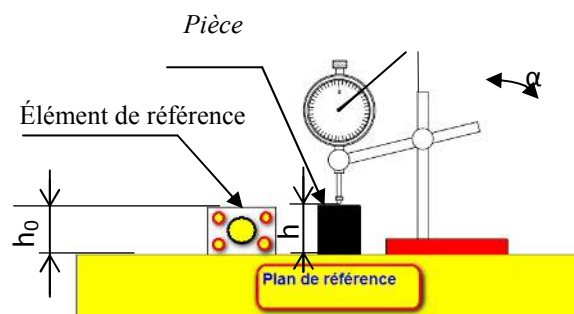


Figure 4.30. Exemple de lecture

Concernant le deuxième exemple de lecture on utilise le comparateur à cadran. pour obtenir l'écart (α) entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence).

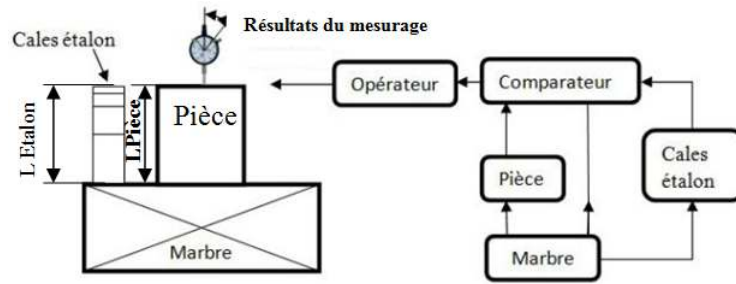


Figure 4.31. Exemple de lecture

$L_{\text{pièce}} = L_{\text{étalon}} + \alpha$ avec ($L_{\text{pièce}}$: Longueur pièce, $L_{\text{étalon}}$: Longueur étalon, α : Ecart mesure)

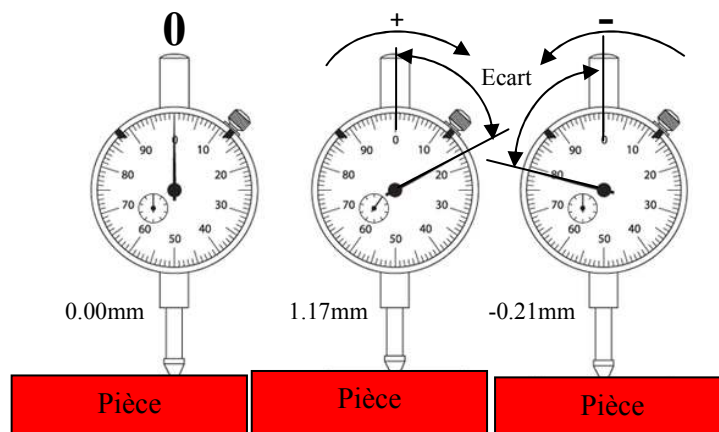


Figure 4.32. Exemple de comparaison

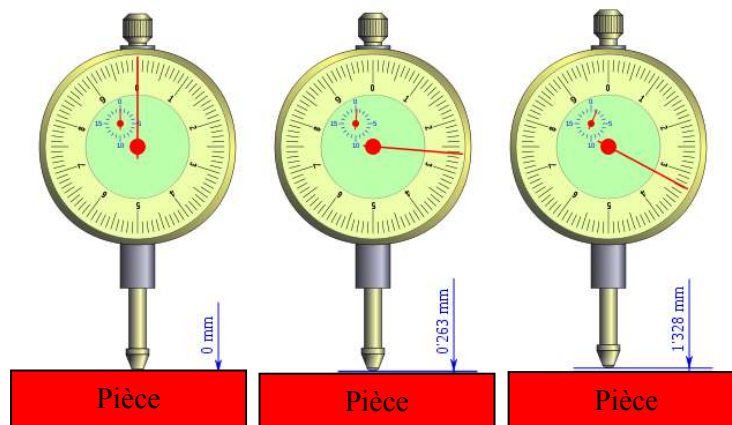


Figure 4.33. Exemple de comparaison

4.3.5 Exemples de vérification

A- parallélisme

Tout d'abord, lorsqu'une pièce est finie, il faut non seulement mesurer des grandeurs, mais parfois il faut aussi vérifier la position relative entre deux surfaces : parallélisme, perpendicularité ou angle qu'elles forment.

Pour la vérification au moyen d'une horloge de comparaison, une bille de vérification doit être utilisée. La pièce est appuyée sur le marbre de vérification et est glissée le long du visage pour

vérifier la sonde d'horloge, vérifiant qu'il n'y a pas de variations pour considérer qu'il y a parallélisme. Avec cet instrument, la planéité d'une surface peut également être vérifiée.

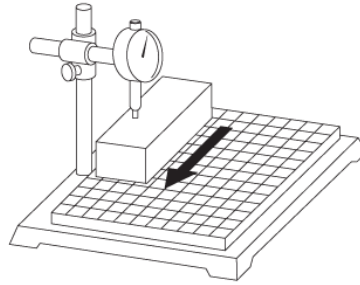
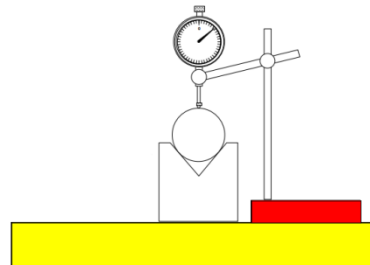


Figure 4.34. Vérification du parallélisme

Les comparateurs peuvent également être utilisés pour mesurer les défauts de forme. La figure 4.34 montre un ensemble destiné à mesurer le défaut de rondeur d'un cylindre reposant sur une monture en V. Dans ce type d'applications, la "mise à zéro" du comparateur est réalisée sur la même pièce à contrôler.



B- forme

Figure 4.35. Exemple pour mesurer les défauts de forme

4.3.6 Cales étalons

Les cales étalons sont des étalons finaux utilisés dans les mesures linéaires. Elles sont utilisées en atelier pour les travaux où une tolérance aussi faible que 0,001 mm est nécessaire. Les gabarits de glissement sont des blocs rectangulaires, en acier de haute qualité, ayant une section transversale d'environ 30 mm X 10 mm.

Ces blocs sont fabriqués dans les dimensions requises et durcis pour résister à l'usure et autorisés à se stabiliser afin de soulager les contraintes internes. Cela empêche l'apparition de variations de taille et de forme. Après le durcissement des blocs, les faces de mesure sont soigneusement finies pour un degré de finition de surface, de planéité et de précision précis. Cette finition de surface de haute qualité est obtenue par un processus de super finition connu sous le nom de rodage.



Figure 4.36. Cales étalons pour la vérification des longueurs

4.4 Machines de mesure et de contrôle

4.4.1 Projecteur de profil

Un projecteur de profil projette une image agrandie, du profil d'une zone ou des caractéristiques d'une pièce sur un écran, en utilisant plus couramment un éclairage diascopique. Les dimensions sur l'écran peuvent être mesurées directement ou comparées à une référence standard au grossissement correct. Pour plus de précision, il est important que l'augmentation ne change pas avec la perspective, par exemple, sa position ou son point de vue de l'opérateur. Par conséquent, les lentilles télécentriques sont hautement souhaitables. L'écran a souvent une grille et cette grille peut être tournée fréquemment à 360 degrés pour s'aligner avec le bord indiqué sur l'écran. Les points, les mesures et les calculs peuvent également être effectués à l'aide d'un simple appareil de lecture numérique. La lumière épiscopique est utilisée pour mesurer des caractéristiques telles que des alésages, des bosses, des sacs, des coussins, etc., qui ne seront pas révélées dans une vue de profil. Un ordinateur peut être ajouté à un système de projecteur de profil pour la détermination des bords, éliminant ainsi certaines erreurs humaines. Les mesures directes sont effectuées par projection du profil. Des mesures angulaires peuvent également être obtenues à l'aide d'un écran rotatif. Il dispose de deux systèmes d'éclairage :

Système de projection : dans lequel le faisceau lumineux tombe sur la pièce, projetant son contour sur l'écran.

Système de réflexion : dans lequel le faisceau lumineux tombe sur une face plate et polie de la pièce, reflétant son image sur l'écran.

Dans un projecteur de profil, il est plus courant d'utiliser le système de projection pour obtenir une image plus claire.

Applications :

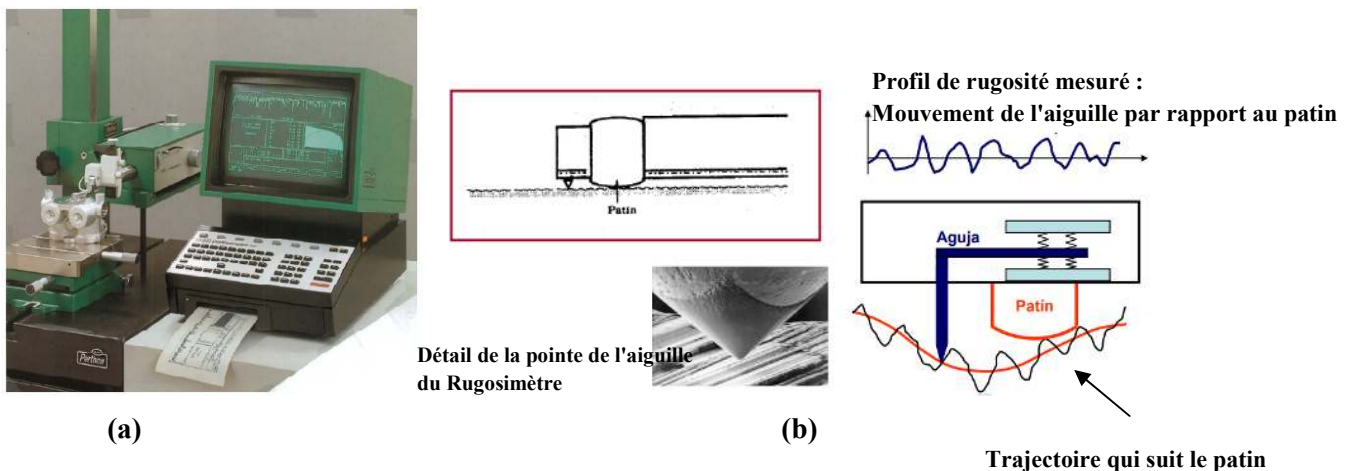
Les projecteurs de profil sont des outils de mesure robustes couramment utilisés dans les ateliers de tournage, les départements de contrôle de qualité et occasionnellement dans les zones de montage. Ils conviennent à la mesure et au contrôle de la qualité pour une large gamme de tailles et de poids d'objets. L'utilisation la plus élémentaire d'un projecteur de profil consiste à identifier un point ou une bordure dans l'ombre et à partir de ce point calculer une longueur. En augmentant l'image, l'opérateur doit faire moins d'erreurs lorsqu'il décide où commence un point ou une arête. Les images de profil peuvent également être utilisées pour prendre une décision simple haut / bas, par exemple, en dessinant une image par rapport à une norme pour déterminer si la pièce a été faite correctement.



Figure 4.37. Machine projecteur de profil

4.4.2 Profilomètre

La mesure de la rugosité est effectuée avec le Rugosimètre. Ce dernier est une machine de mesure et de contrôle utilisé en atelier mécanique pour vérifier la qualité de l'état de surface d'une pièce, ainsi cette machine est basée sur le contact physique entre une pointe en diamant et la surface à mesurer.

Figure 4.38. (a) **Profilomètre** et (b) avec l'explication des différents étapes de vérification de l'état de surface

4.4.3 Comparateur pneumatique

Comparateur pneumatique elle repose sur la transformation des variations de la taille des pièces en variations de pression ou de débit de l'air qui lui est fourni.

Dans ces appareils, l'amplification est basée sur les changements de pression qui se produisent dans une chambre dans laquelle un flux d'air entre à une vitesse constante lorsque les conditions de sortie de l'air à travers un trou varient.



Figure 4.39. Comparateur pneumatique

Dans la fig.4.40, ce principe est schématisé, le comparateur est alimenté en air à pression constante à travers le trou de commande (1), l'air passe à la chambre (2) à laquelle un manomètre (3) est relié à la tête pneumatique il permet à plus ou moins d'air de s'échapper en fonction de la séparation entre l'orifice de sortie (4) et la surface de la pièce à mesurer (5). Les variations de pression dans la chambre sont proportionnellement liées à la séparation entre l'orifice de sortie et la surface mesurée. Le manomètre peut être calibré pour qu'il indique directement la valeur de l'écart obtenu en centièmes ou millièmes de millimètres. L'instrument peut être mis à zéro (mesure nominale à inspecter) en utilisant des mesures parallèles plates, des anneaux calibrés, etc.

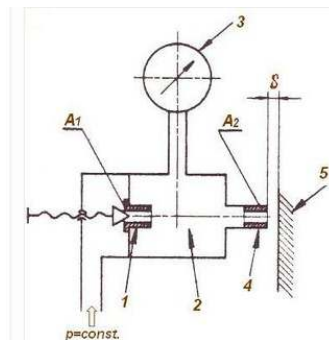


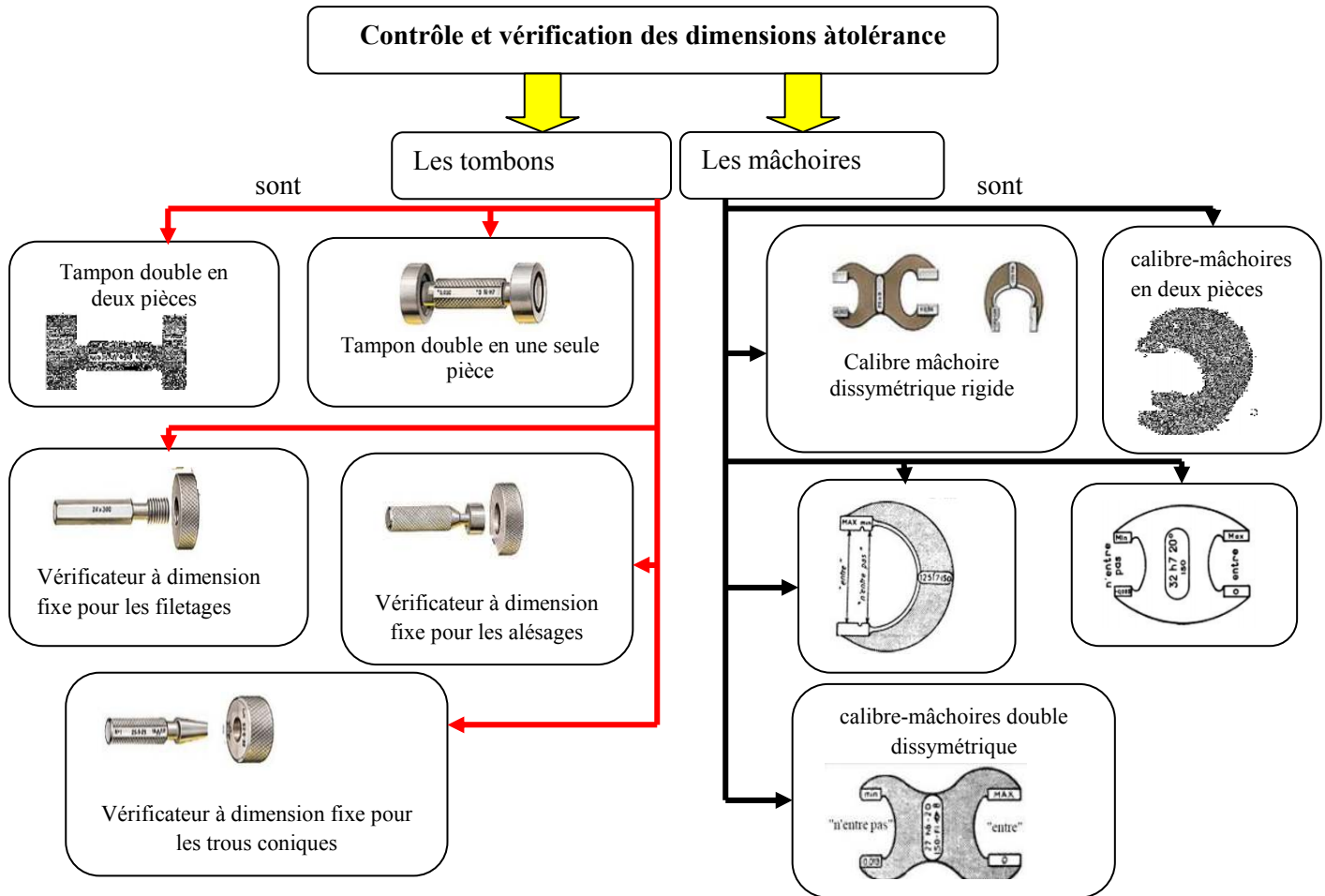
Figure 4. 40. Schéma de fonctionnement d'un comparateur pneumatique.

4.5 Contrôle et vérification des dimensions à tolérance (fixe)

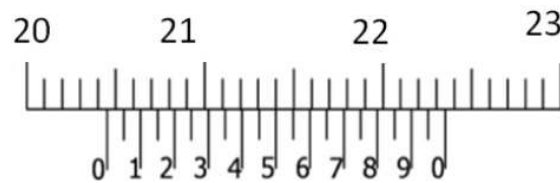
4.5.1 Tampons et les mâchoires

Contrôle dimension c'est l'ensemble des opérations permettant de déterminer si la valeur d'une grandeur se trouve bien entre les limites de tolérance qui lui sont imposées. Ces moyennes sont employées pour s'assurer que les cotes des pièces exécutées sont bien comprises entre les tolérances prévues sur le dessin de définition. La vérification des tolérances dimensionnelles des pièces mécaniques est basée sur le principe « La pièce "entre" ou "n'entre pas" ».

4.5.2 Différents outils



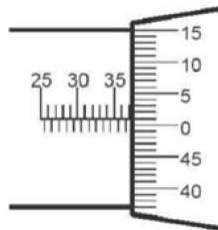
- ☐ 9.60mm
- ☐ 9.70mm
- ☐ 9.80mm



- ☐ 204.45mm
- ☐ 204.50mm
- ☐ 204.55mm

Exercices 2

Donner selon le principe du micromètre les lectures, en précision l'unité de mesure



- 37.1mm
- 37.2mm
- 37.02mm
- 37.50mm

Références bibliographiques

- [01] Teaching Quantitative Skills in the Geosciences, Cathryn A. Manduca, Carleton College, 2002.
- [02] Mesure et incertitudes Programmes de physique - chimie MESURE et incertitudes Académie Nancy-Metz
- [03] International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) 3rd edition 2008.
- [04] National Institute of Standards and Technology Special Publication 330, 1991 Edition Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 330, 1991 Edition, 62 pages (Aug. 1991) CODEN : NSPUE2
- [05] Prof. J. Ramkumar Department of Mechanical Engineering IIT Kanpur October 24, 2017 Engineering Metrology
- [06] KAOUKA A. Département : Sciences et Techniques, polycopie Métrologie Niveau : 2^{ème} année LMD S. Université Amar Telidji-Laghouat Enseignant : 2010-2011.
- [07] S. Bensaada et D. Feliachi. « Le dessin technique, deuxième partie : Le dessin industriel ». Edition O.P.U, 1994
- [08] Polycopie de métrologie : Lycée professionnel Gaston Barré Certificat d'aptitude professionnelle Vendeur Magasinier en pièces de Rechange et Equipements Automobiles (SESSION 2012-2013).

Sitographie (Liens internet)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Divers/vernier.html
<http://scphysiques.free.fr/2nde/documents/micrometre.swf>
<http://eduscol.education.fr/cid60323/ressources-pour-lelycee.html>
www.iso.ch OIML
www.oiml.org BIPM
www.bipm.fr CGPM
www.bipm.fr/fra/2_Committees/cgpm.html CIPM
www.bipm.fr/fra/2_Committees/cipm.htm

Références bibliographiques proposées dans le canevas Licence génie mécanique, génie civil et hydraulique

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