

MS 372
METROLOGIE/Cours N°1_2024-2025

Présenté par
Pr. HAMOU Saïd



Programme

Chapitre 1: Généralités sur la métrologie

- 1.1 Définition des différents types de métrologie (Scientifique dite de laboratoire, légale, industrielle);
- 1.2 Vocabulaire métrologique, définition;
- 1.3 Les institutions nationale et internationale de métrologie

2 semaines

Chapitre 2: Le système international de mesure

- 2.1 Les grandeurs de base et leurs unités de mesure
- 2.2 Les grandeurs supplémentaires;
- 2.3 Les grandeurs dérivées

3 semaines

Chapitre 3: Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

- 3.1 Erreurs et incertitude (justesse, précision, fidélité, répétitivité, reproductivité d'un appareil de mesure)
- 3.2 Classification des erreurs de mesure
 - 3.2.1 Valeur brute;
 - 3.2.2 Erreur systématique
 - 3.2.3 Valeur brute corrigée
- 3.3 Erreurs fortuites
 - 3.3.1 Erreurs aléatoires;
 - 3.3.2 Erreurs parasites
 - 3.3.3 Erreurs systématiques estimées
- 3.4 Intervalle de confiance;
- 3.5 Incertitude technique
- 3.6 Incertitude de mesure totale
- 3.7 Résultat de mesurage complet
- 3.8 Identification et interprétation des spécifications d'un dessin de définition en vue du contrôle
- 3.9 Notions de base sur les calibres les jauges et les instruments de mesure simples

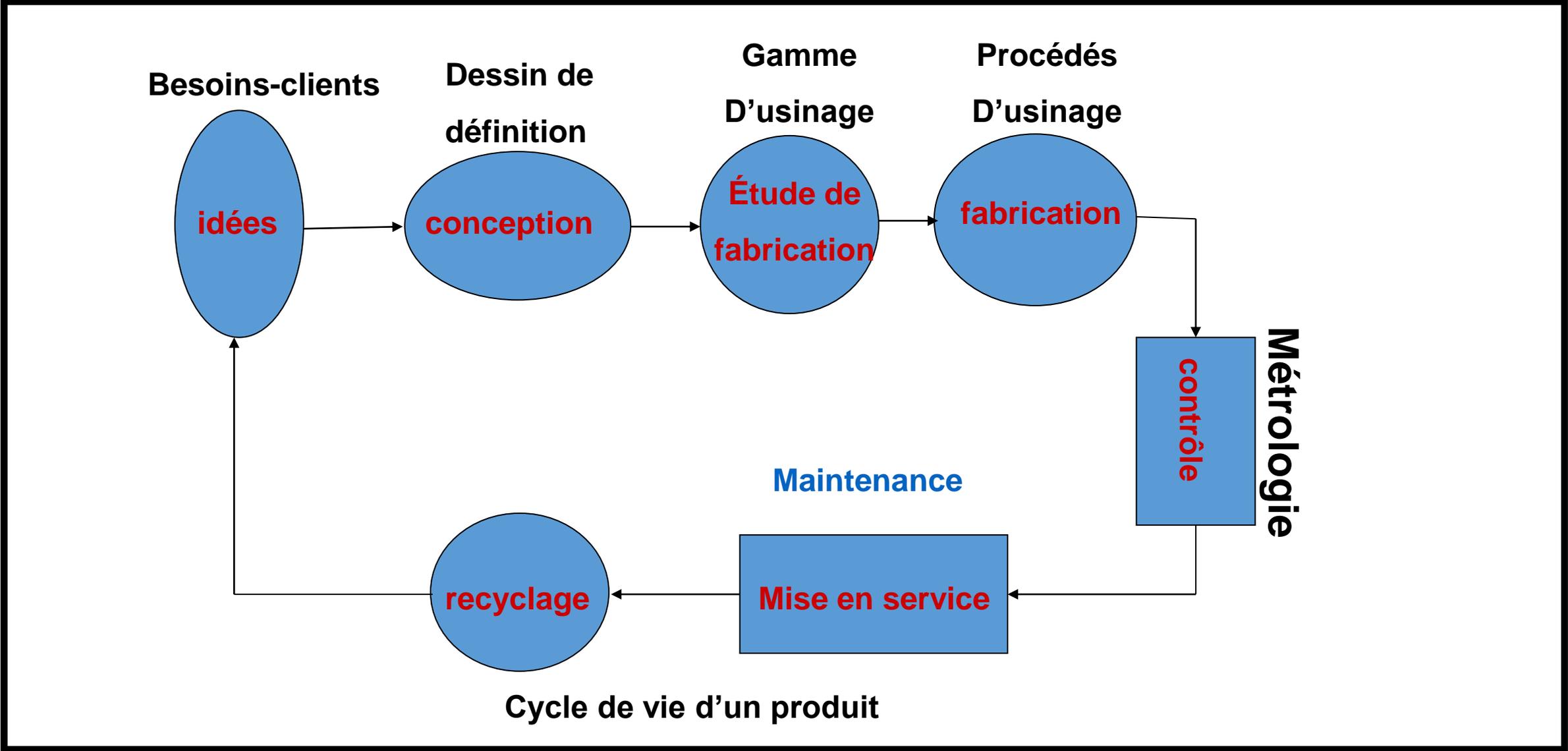
6 semaines

Chapitre 4: Mesure et contrôle

- 4.1 Mesure directe des longueurs et des angles (utilisation de la règle, du pied à coulisse, du micromètre et du rapporteur d'angle)
- 4.2 Mesure indirecte (utilisation du comparateur , des cales étalons)
- 4.3 Contrôle des dimensions (utilisations des tampons, des mâchoires,...)
- 4.4 Machines de mesure et de contrôle utilisées en atelier mécanique (utilisations du comparateur pneumatique, projecteur de profils et rugosimètre)

4 semaines

Chapitre 1: Généralités sur la métrologie dimensionnelle



LA MÉTROLOGIE

La métrologie définit l'opération ou l'ensemble des opérations permettant de déterminer avec précision la ou les valeurs des grandeurs à mesurer.

Elle doit préciser et justifier le choix des moyens de mesure et les conditions d'usinage.

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

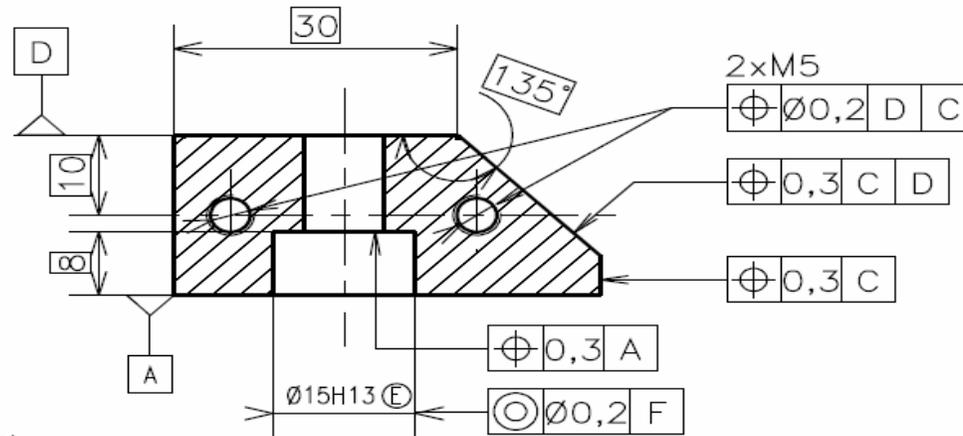
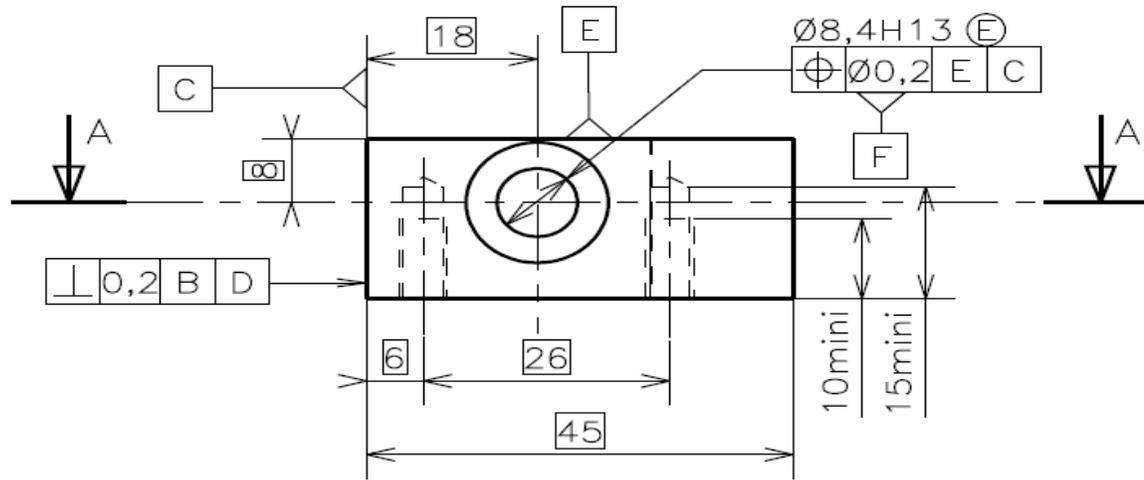
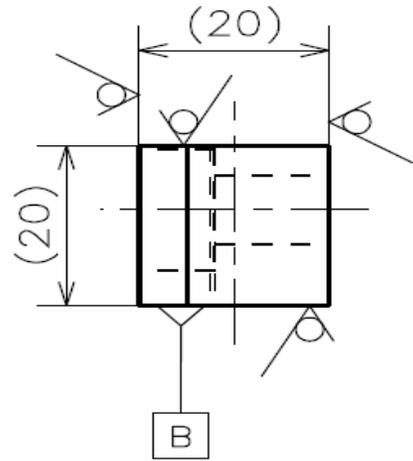
- au contrôle des pièces exécutées ou en cours d'usinage
- au contrôle, sur machine de la position de la pièce par rapport à l'outil
- à la vérification géométrique des machines-outils- au contrôle statistique des performances possibles sur chaque machine-outil.

En mécanique automobile, la métrologie s'intéresse :

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

CONDITIONS D'EXÉCUTION

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



Tolérancements : ISO 8015 - 1985
 NFE 04-552 - 1983
 ISO 2768-mK - 1989

Etats de surface : $Ra\ 3.2$ partout sauf indications

Dessin de définition

Ensemble : APPUI D'ETAU ET DE PIECE

Matière : E 335



SUPPORT

Brut : étiré 20 x 20

Echelle : 1 : 1

Modifié le : 20/11/04

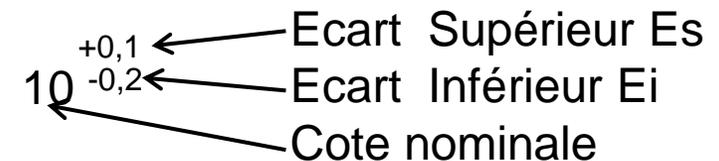
Les produits manufacturés sont conçus sur des plans (Dessin de définition). Ces plans comportent une représentation graphique de chaque pièce à réaliser ainsi que des annotations complémentaires (spécifications ou exigences) dont fait partie la cotation.

Normalisation

La métrologie n'a de sens que si le **concepteur** et le **métrologue** interprètent cette cotation de la même manière. Les normes servent à fixer les définitions et les méthodes de travail. Dans le domaine de la métrologie, les normes sont regroupées sous l'appellation GPS (Spécifications Géométriques des Produits) et sont disponibles à l'AFNOR.

Nous classerons la cotation en 2 grandes familles :

- Les spécifications dimensionnelles.**
- Les spécifications géométriques.**



Spécifications dimensionnelles

Les spécifications **dimensionnelles** peuvent se présenter sous plusieurs formes :

- Cas général :

Exemple :

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

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

La différence entre T_s et T_i s'appelle Intervalle de Tolérance : **IT=0,3**

Tolérances de forme

rectitude		ligne
planéité		plan
circularité		ligne
cylindricité		cylindre
forme d'une ligne quelconque		ligne
forme d'une surface quelconque		surface

Tolérances d'orientation

parallélisme		ligne; surface
perpendicularité		ligne; surface
inclinaison		ligne; surface

Tolérances de position

localisation		point; ligne; surface
concentricité		point
coaxialité		ligne
symétrie		ligne; surface

Tolérances de battement

battement simple		ligne
battement total		surface

METROLOGIE DIMENSIONNELLE

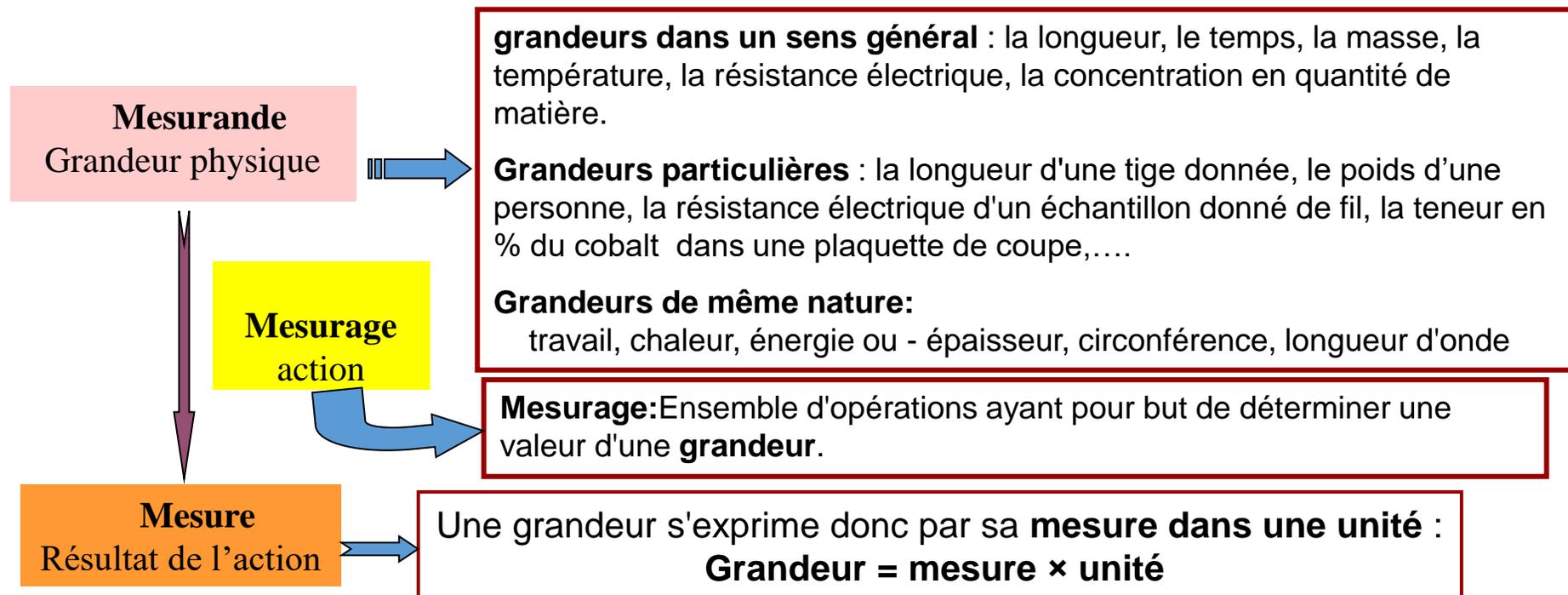
La métrologie est l'ensemble des moyens techniques utilisés pour le contrôle de pièces mécaniques.

La métrologie est donc un acte technique permettant de déterminer la conformité d'un produit. Pour effectuer une mesure ou un contrôle sur un produit, il faut au préalable en déterminer les caractéristiques et choisir les limites (les usineurs diraient les tolérances) à l'intérieur desquelles le produit est conforme. Il faut que ces limites soient connues par le « métrologue » qui effectuera le contrôle.

Il implique également qu'à l'issue de cet acte technique (mesure ou contrôle), une décision soit prise en ce qui concerne la conformité :

- * produit conforme
- * produit non-conforme qui doit être rebuté
- * produit non conforme pouvant être retouché
- * produit non-conforme pouvant être accepté en dérogation.

- **La métrologie est la science de la mesure au sens le plus large.**
- La **mesure** est une représentation quantifiée d'une **grandeur physique**, elle consiste à donner une **valeur** à une observation. Cette valeur est généralement suivie d'une **unité** basée sur un **étalon**



L'**unité** de mesure est une grandeur particulière, liée à un **étalon** défini et adopté par convention (SI), à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement par rapport à cette grandeur.

Un **étalon** est une mesure matérialisée définie comme référence pour chaque **grandeur mesurable** conservé au **BIPM (Bureau international des poids et mesures à PARIS)**

1.3 Les institutions nationale et internationale de métrologie

- Pour qu'un étalon soit reconnu, il faut que les utilisateurs des appareils de mesure connaissent son existence et acceptent de l'utiliser. Ce rôle de sélection et de reconnaissance des étalons est délégué à des organismes de normalisation (*standardisation* en anglais).
- Il y a deux organismes reconnus internationalement :
- le [Bureau international des poids et mesures](#) situé au Pavillon de Breteuil à [Sèvres](#), créé par le traité diplomatique de la [Convention du Mètre](#) et auquel adhèrent environ 50 pays ; c'est un organisme officiel ;
- l'[ISO](#), qui fédère les organismes nationaux de normalisation.

- Chaque pays a par la suite son propre organisme de normalisation : [Association française de normalisation](#) — [Afnor](#) en France, le [National Institute for Science and Technology](#) — [NIST](#) aux États-Unis, le [Deutsches Institut für Normung](#) — [DIN](#) en Allemagne, l'[Institut belge de normalisation](#) — [IBN](#) en Belgique, le [British Standards Institution](#) — [BSI](#) au Royaume-Uni, l' [Office fédéral de Métrologie](#) — [METAS](#) en Suisse ... Notons que ces organismes nationaux sont privés (l'Afnor par exemple est une [association](#) regroupant les industriels) et que les normes qu'ils éditent ne sont pas libres de droit mais payantes.

Chapitre 2: Le système international de mesure **SI**

- Le **Système International d'Unités** a pour objet une meilleure uniformité, donc une meilleure compréhension mutuelle dans l'usage général de la mesure.
- Le SI est fondé actuellement sur les sept unités de base suivantes :
- Longueur: m;
- Masse: kg;
- Temps (durée): s;
- Température:k(kelvin);
- intensité du courant électrique: A;
- quantité de matière/nombre de particules : mole;
- Luminosité: candela cd;

Ces unités forment les unités de base du système international (uSI).

- **Unité de longueur : le mètre (m)**
Définition de la 17^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures de 1983
- **Unité de masse : le kilogramme (kg)**
Le kilogramme est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.
Définition de la 1^{ère} CGPM de 1889 et de la 3^{ème} CGPM de 1901

Définition des unités de base (suite)

- **Unité de temps : la seconde (s)**
 - ***La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.***
 - *Définition de la 13^{ème} CGPM de 1967*
- **Unité de courant électrique : l'ampère (A)**
 - ***L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur.***
 - *Définition du CIPM en 1946 et approuvée par la 9^{ème} CGPM de 1948.*
- **Unité de température thermodynamique : le kelvin (K)**
 - ***Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.***
 - *Définition de la 13^{ème} CGPM de 1967. Il est décidé également par la 13^{ème} CGPM que l'unité kelvin et son symbole K sont utilisés pour exprimer un intervalle ou une différence de température.*

Définition des unités de base (suite)

- **Unité de quantité de matière : la mole (mol)**
 - *La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. Lorsque l'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.*
 - *Définition de la 14^{ème} CGPM de 1971*
- **Unité d'intensité lumineuse : la candela**
 - *La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.10^{-12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ watt par stéradian*
 - *Définition de la 16^{ème} CGPM de 1979*

Unités dérivées

Ils existent des **unités dérivées**, qui portent des noms et des symboles spéciaux; par exemple, dans le SI :

- Surface: **m²**,
- volume **m³**,
- Vitesse: **m/s**;
- acceleration **m/s²**
- Force: **N**; **kg.m/s²**
- Énergie: **J**;
- Pression, contrainte: **Pa**;
- Fréquence: **Hz**;
- Puissance: **W**;
- Résistance électrique: **Ohm**;
- Inductance: **Henry (H)**;.....

Préfixes des multiples du SI

• FACTEURS	PREFIXES	SYMBOLES
• 10^{24}	yotta	Y
• 10^{21}	zetta	Z
• 10^{18}	exa	E
• 10^{15}	peta	P
• 10^{12}	téra	T
• 10^9	giga	G
• 10^6	méga	M
• 10^3	kilo	k
• 10^2	hecto	h
• 10^1	déca	da

Préfixes des sous-multiples du SI

• FACTEURS	PREFIXES	SYMBOLES
• 10^{-24}	yocto	y
• 10^{-21}	zepto	z
• 10^{-18}	atto	a
• 10^{-15}	femto	f
• 10^{-12}	pico	p
• 10^{-9}	nano	n
• 10^{-6}	micro	μ
• 10^{-3}	milli	m
• 10^{-2}	centi	c
• 10^{-1}	déci	d

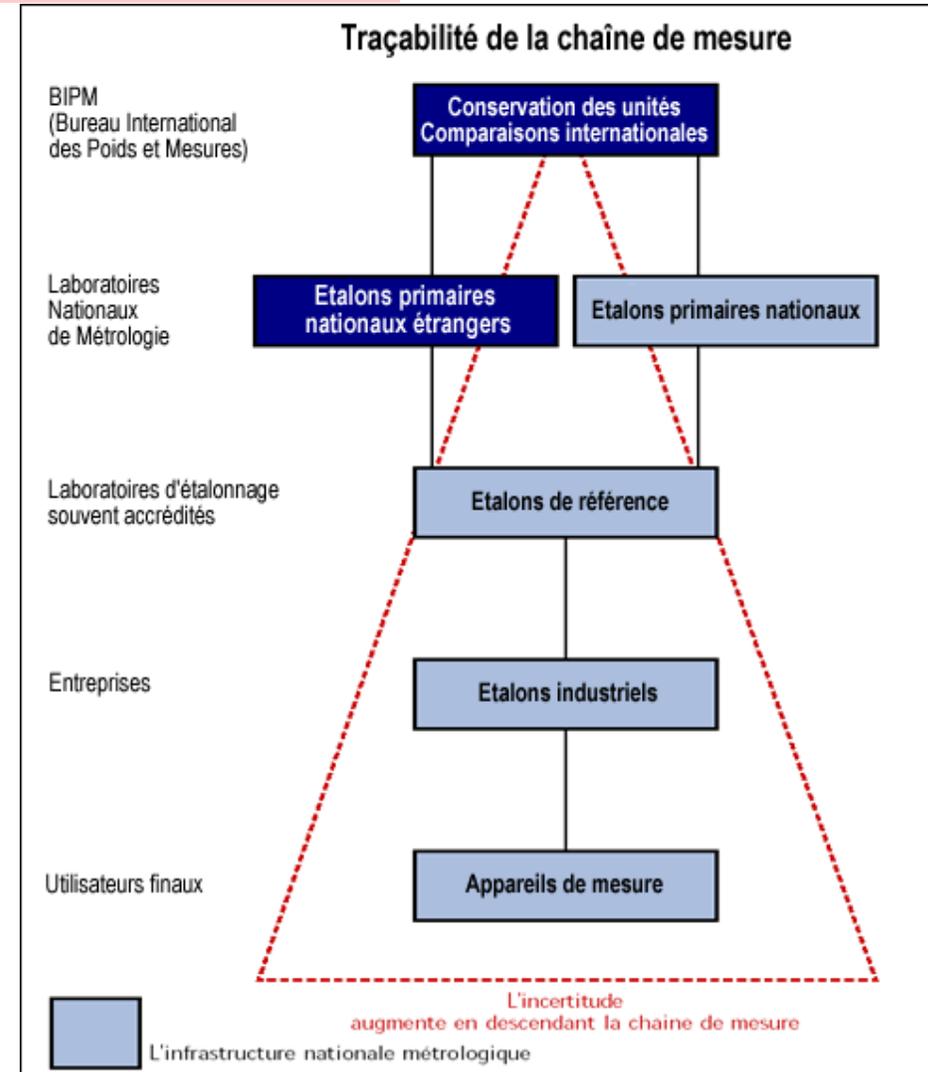
Chapitre 3: Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

Vérification, étalonnage et ajustage d'un appareil

- **La vérification métrologique** consiste à apporter la preuve par des mesures (étalonnage) que des exigences spécifiées sont satisfaites. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de conformité (suivie d'une remise en service) ou de non conformité (suivie d'un ajustage, d'une réparation, d'un déclassement ou d'une réforme de l'appareil).
- **L'ajustage** consiste à ramener l'appareil dans des tolérances d'exactitude de mesure plus fine.
- **Échantillonnage**
Dans certains cas, le phénomène que l'on veut évaluer n'est pas homogène, il faut donc faire plusieurs mesures.
Par exemple, si l'on veut mesurer l'épaisseur d'une plaque, il faut le faire en plusieurs endroits car l'épaisseur n'est pas strictement constante.
- **L'étalonnage** est l'opération qui consiste à comparer les valeurs indiquées par l'appareil à étalonner avec les valeurs de références correspondantes (étalons). Dans certains domaines réglementés, l'étalonnage est obligatoire, par exemple lorsque les erreurs peuvent provoquer des accidents, des dérives sur la qualité d'un produit ou dans les opérations d'échanges commerciaux (métrologie légale).

Chaîne d'étalonnage

- **Chaîne d'étalonnage**
- Une chaîne d'étalonnage est une chaîne continue de comparaisons ayant toutes des incertitudes connues. Cela garantit qu'un résultat de mesure ou la valeur d'un **étalon** sont **rattachés à des références de niveau supérieur**, dont le sommet est l'**étalon primaire**.
- On définit plusieurs types d'étalons :
- **Étalon primaire** : Étalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.
- **Étalon de référence** : Étalon, en général de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.
- **Étalon de transfert** : Étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
- **Étalon de travail** : Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.



Types de métrologies

On distingue couramment trois types de métrologies :

- **Métrologie scientifique ou fondamentale**

La **métrologie scientifique** est la partie de la métrologie qui est chargée de définir les unités de mesure, de les réaliser, de les conserver et de les disséminer (étalons nationaux ou internationaux).

- **Métrologie industrielle**

La **métrologie industrielle**, quant à elle, est chargée de transférer les unités de mesure vers les utilisateurs finaux que sont les industriels, les commerçants, les artisans et, en gros, tous ceux qui utilisent des instruments de mesure.

Le transfert des unités de mesure se fait grâce à l'étalonnage.

Ce domaine est l'interface entre les laboratoires d'étalonnage nationaux de métrologie accrédités et le citoyen.

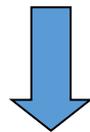
- **Métrologie légale**

La **métrologie légale** est la « partie de la métrologie se rapportant aux activités qui résultent d'exigences réglementaires et qui s'appliquent aux mesurages, aux unités de mesure, aux instruments de mesure et leurs utilisations. Elle est effectuée par des organismes compétents ».

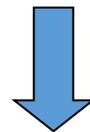
Erreurs de mesure

En sciences expérimentales, il n'existe pas de mesures exactes

**Toute mesure expérimentale est entachée
d'erreurs**



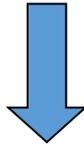
Valeur réelle - Valeur mesurée = erreur de mesure = E



**E n'est jamais connue exactement, doit-être évaluée afin
de la réduire au minimum**

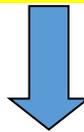
Imprécision d'une mesure - Erreur absolue et relative

L'erreur absolue est l'imprécision avec laquelle une grandeur, a , est mesurée. On notera : $a \pm \Delta a$



L'erreur relative (de justesse) est le quotient de l'erreur absolue par la valeur de cette grandeur. L'erreur relative sur a vaut :

$$\frac{\Delta a}{a} \quad \text{ou} \quad 100 \frac{\Delta a}{a} (\%)$$



E n'est jamais connue exactement doit-être évaluée afin de la réduire au minimum

Exemple



Sur ce voltmètre, on peut lire une valeur de 15.27 V

L'erreur absolue est de 0.005 V, donc nous noterons notre résultat sous la forme :

Mes = 15.27 V \pm 0.005 V.

L'erreur relative quant à elle vaut :

$$\frac{0.005}{15.27} 100 = 0.03\%$$

LES ERREURS EXPÉRIMENTALES

Trois types d'erreur

Erreurs Systématiques

appelées aussi «**biais**», Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables.

Les erreurs **systématiques** affectent l'**exactitude** (justesse).

Erreurs Grossières

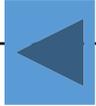
Elles résultent d'une fausse manoeuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil.

Mesure isolée soit par filtrage ou par méthode statistique

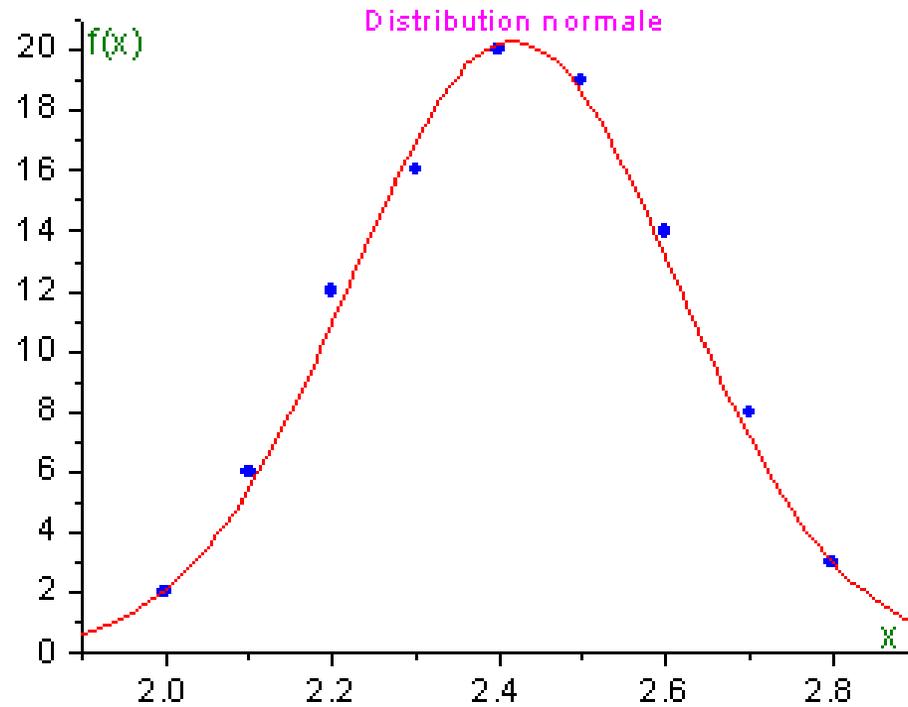
Erreur Aléatoire

Ce sont des erreurs, non reproductibles, se répartissent **de part et d'autre** de la valeur moyenne et obéissent à des lois statistiques(**loi Normale**) (*variance, écart-type, étendue*). (causes inconnues)

Les erreurs **aléatoires** sont relatives à la **fidélité** (précision).



Loi normale



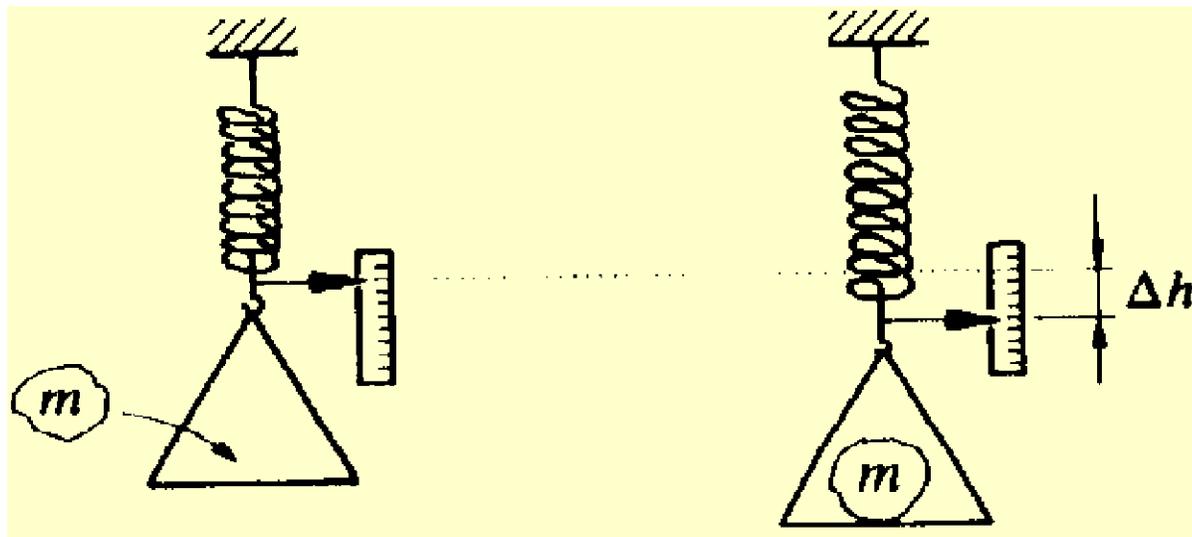
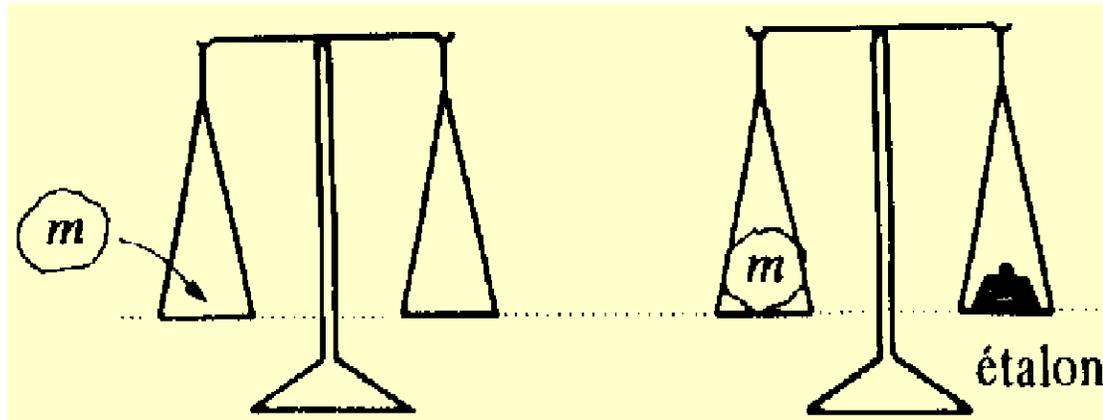
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\bar{x} - \sigma_x \text{ et } \bar{x} + \sigma_x$$

Mesure directe et indirecte



Propagation des erreurs

- **Règle 1:** si vous additionnez ou soustrayez x et y , l'incertitude absolue de $(x+y)$ ou de $(x-y)$ est obtenue en additionnant les incertitudes absolues x et y au carré.

$$dx = dy + dz$$

{ Dans le cas d'une somme ou d'une différence, les erreurs absolues s'ajoutent. }

- **Règle 2:** si vous multipliez ou divisez x et y , l'incertitude fractionnaire de $(x*y)$ ou de (x/y) est obtenue en additionnant les incertitudes fractionnaires x/x et y/y au carré.

$$dx/x = dz/z + dy/y$$

{ Dans le cas d'un produit ou d'un quotient, les erreurs relatives s'ajoutent. }

ÉXISTENCE DES ERREURS

INSTRUMENT

- Graduation –
- Rigidité et stabilité des matériaux
- Jeux de guidage –
- Déformations des contacts dues aux efforts
- Défauts de forme des palpeurs
- Frottement

OPÉRATEUR

- Mauvaises lectures (parallaxe, ...)
- Mauvaises manipulation (mise en place, étalonnage, ...)

ERREURS DE
MESURE

ENVIRONNEMENT

- Température
- Hygrométrie
- Milieu agressif (poussière, ...)
- Rigidité et stabilité du référentiel

PIÈCE

- Préparation de la pièce (bavure, ...)
- Rigidité et stabilité des matériaux

Qualité métrologique des appareils de mesure

Les principales caractéristiques des instruments de mesure (ou propriétés métrologiques des dispositifs de mesure) sont définies dans le cadre du **Vocabulaire International de Métrologie (VIM)** et comprennent, entre autres :

- l'étendue de mesure;**
- la résolution;**
- la sensibilité;**
- la non linéarité;**
- l'hystérésis;**
- l'exactitude ou la précision;**
- la justesse;**
- la fidélité.**

Définition des caractéristiques métrologiques

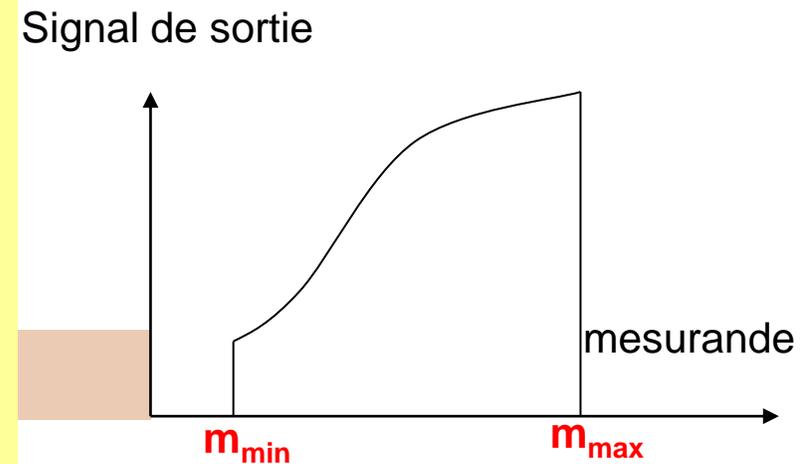
- Étendue de mesure
- Elle est la plage de valeurs du mesurande pour lesquelles l'appareil répond aux spécification du constructeur

$$EM = m_{\max} - m_{\min}$$

- L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.

Exemple : Capteur de force à jauges extensométriques

0-10N(EM) 0°C – 60°C



Définition des caractéristiques métrologiques

- Résolution :

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que l'appareil de mesure est susceptible de détecter..

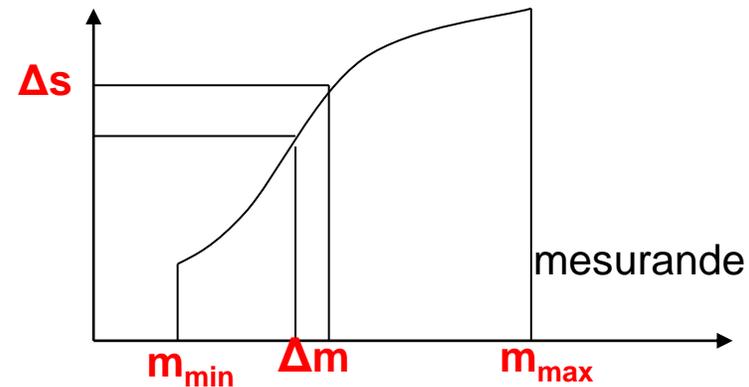
→ Unité : celle du mesurande.

Définition des caractéristiques métrologiques

La sensibilité

La sensibilité d'un appareil est la plus petite variation de mesure qu'il peut déceler.

La sensibilité est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie en fonction de la variation du signal d'entrée.



$$S(m) = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_m$$

$$\text{unité de } S = \frac{\text{unité grandeur électrique}}{\text{unité mesurande}}$$

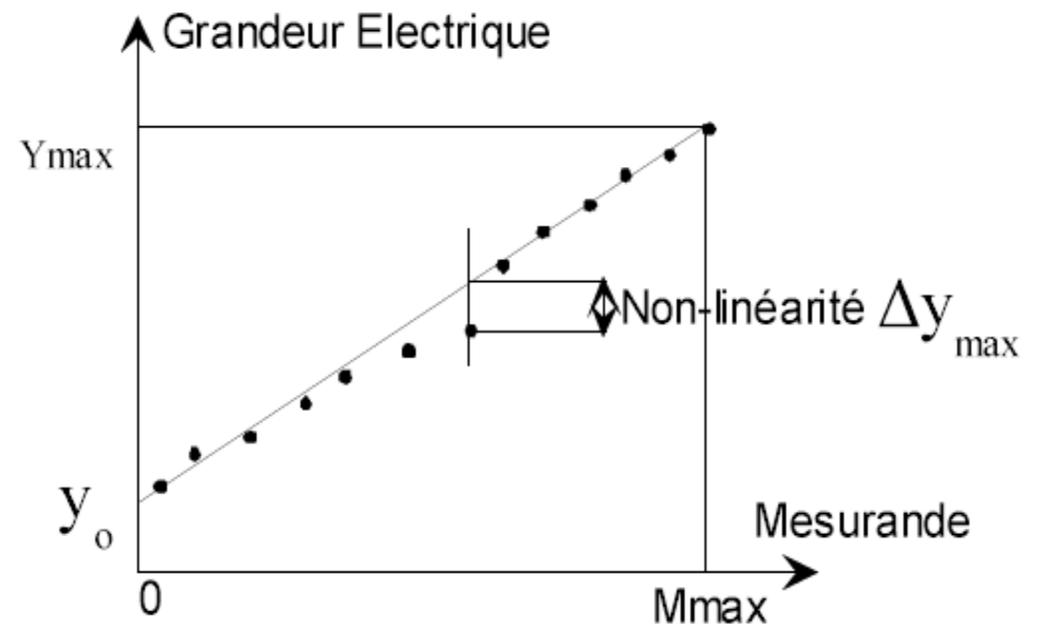
Remarque: La sensibilité d'un capteur linéaire est constante

Définition des caractéristiques métrologiques

Non-linéarité :

La non-linéarité est la déviation maximale de la réponse de l'appareil sur l'étendue de mesure, par rapport à la fonction de transfert linéaire.

$$\text{Erreur relative de linéarité} = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_0}$$

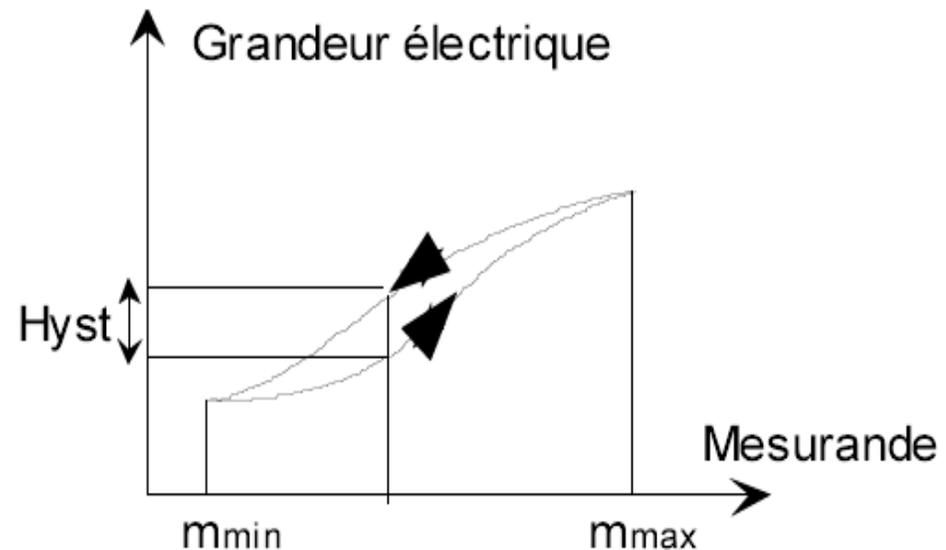


Définition des caractéristiques métrologiques

Hystérésis :

Certains appareils ne retournent pas la même valeur de sortie, pour une même valeur du mesurande, selon la façon où cette valeur est obtenue (cycle croissant ou décroissant). L'hystérésis est la différence maximale entre ces deux valeurs de sortie.

**Unité : Unité du mesurande
ou % de l'E.M.**



Définition des caractéristiques statistiques

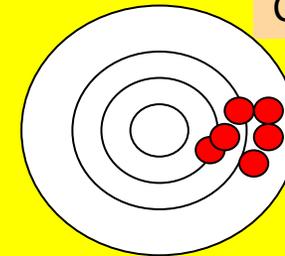
- Caractéristiques métrologiques (suite):

La fidélité

La fidélité est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs sont faibles. L'écart-type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité.

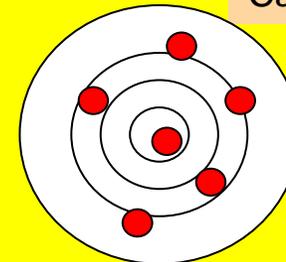
La justesse

C'est l'aptitude de l'appareil à donner des résultats qui ne sont pas entachés d'erreur. Dans le cas de mesures multiples c'est l'écart entre le résultat moyen et la valeur vraie.



Capteur fidèle

Pas juste mais fidèle



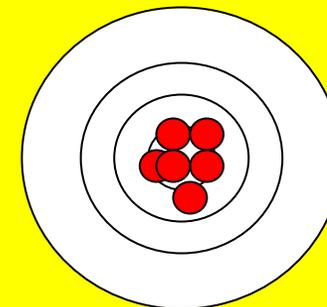
Capteur juste

Juste mais pas fidèle

Définition des caractéristiques statistiques

- La précision ou l'exactitude
- La Précision est la qualité qui caractérise l'aptitude d'un appareil de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée. L'erreur de précision est la somme de l'erreur de **justesse, liée à la moyenne**, et de **l'erreur de fidélité, caractérisée par l'écart-type**

–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.



Précis

Un appareil **précis** est à la fois **juste et fidèle**



Justesse, Fidélité et Erreur : Exemple

Quatre opérateurs A, B, C et D mesurent la longueur d'une pièce à l'aide d'un pied à coulisse (précision de 0,05 mm)

A	B	C	D
10,08	9,88	10,19	10,04
10,11	10,14	9,79	9,98
10,09	10,02	9,69	10,02
10,10	9,80	10,05	9,97
10,12	10,21	9,78	10,04



A	B	C	D
10,08	9,88	10,19	10,04
10,11	10,14	9,79	9,98
10,09	10,02	9,69	10,02
10,10	9,80	10,05	9,97
10,12	10,21	9,78	10,04

	Inexact	Exact	Inexact	Exact
moyenne	10,10	10,01	9,90	10,01
écart-type	0,016	0,172	0,21	0,033
	Précis	Imprécis	Imprécis	Précis

