

Chapitre 3 : Caractéristiques métrologiques des appareils de mesure

■ *Introduction*

Les résultats des mesures que vous allez faire doivent pouvoir être utilisés par tous, tout comme vous devez pouvoir utiliser ceux obtenus par d'autres. C'est le cas pour l'étalonnage par exemple. Au-delà d'un système d'unité commun à tous, il faut définir une convention commune dans l'expression des résultats. Cela commence par le vocabulaire, l'expression mathématique et bien entendu le calcul d'incertitude, qui va être le gros morceau de ce mini projet. La logique est que l'information soit claire, complète et exploitable. Pour cela, il existe tout un corpus de normes à respecter que vous devez connaître. L'estimation de l'incertitude d'un mesurage est souvent plus dure que le mesurage lui-même. Elle nécessite de bien connaître le processus de mesure dans ses moindres détails et quelques notions de statistique. Ce mini projet a pour la notion de métrologie et la concept d'incertitude, enfin la limite physique,

Par exemple, la masse d'un corps précise son inertie, la pression et la température caractérisent l'état thermodynamique d'un système, etc..

L'expression d'une grandeur physique comprend trois éléments indissociables:

- Une valeur numérique
- Une unité
- Une incertitude

■ *Les caractéristiques métrologiques*

Les caractéristiques métrologiques des instruments de mesure sont définies dans le cadre du Vocabulaire International de Métrologie comprenant, entre autres

- Les erreurs de mesure,
- Etalonnage du capteur,
- Limites d'utilisation,
- Sensibilité,
- Dérive,
- Rapidité et temps de réponse
- Reproductibilité, répétabilité



■ *La qualité métrologique d'un appareil de mesure*

Est l'ensemble des caractéristiques qui fera qu'un appareil de mesure effectuera les mesures avec la qualité correspondante à l'attente de l'utilisateur,

La qualité d'un appareil est définie par les caractéristiques suivantes:

- L'étendue
- La sensibilité
- La précision
- La justesse
- La fidélité



▪ Technologie:
électroniques

▪ Capacité de pesée:
Min: 300 g (10.58 oz)
Max: 12000 g (423.29 oz)

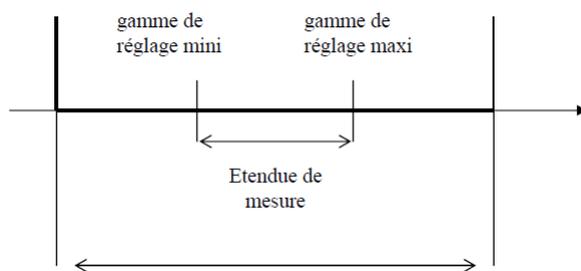
▪ Mode d'affichage:
avec afficheur LCD

▪ Précision de lecture:
0.01 g (0 oz), 0.001 g (0 oz), 1 g (0.04 oz),
0.1 g (0 oz)

▪ Configuration:
de paillasse

L'**étendue de mesure** correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.



La sensibilité

Soit X la grandeur à mesurer, x l'indication ou le signal fourni par l'appareil. A toutes valeurs de X , appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de x ($x = f(X)$).

La sensibilité autour d'une valeur X_0 de X est $m = \frac{dx}{dX}(X_0) = f'(X_0)$. Si la fonction est linéaire, la sensibilité de l'appareil est constante. Lorsque x et X sont de même nature, m qui est alors sans dimension peut être appelée gain qui s'exprime généralement en dB [gain (dB) = $20\log(m)$].



La précision

La classe de précision d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure :

$$\text{classe}(\%) = 100 \cdot \frac{\text{plus grande erreur possible}}{\text{étendue de mesure}}$$

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par la formule suivante :

$$\text{résolution} = \frac{\text{étendue de la mesure}}{\text{nombre de points de la mesure}}$$

400 g
0.001g



La justesse

L'erreur de justesse est l'erreur globale résultant de toutes les causes pour chacun des résultats de mesure pris isolément. C'est donc l'aptitude de l'appareil à donner des résultats qui ne sont pas entachés d'erreur.

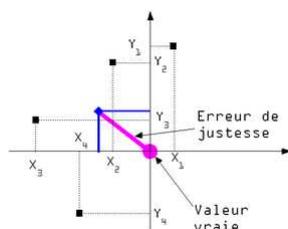
Dans le cas de mesures multiples c'est l'écart entre le résultat moyen et la valeur vraie.

$$J = \bar{v} - V$$

\bar{v} = moyenne arithmétique d'un grand nombre de mesures

V = valeur vraie (ou conventionnellement vraie)

Si l'on effectue une représentation en deux dimensions en considérant la valeur vraie comme l'origine on peut considérer l'erreur de justesse comme le barycentre de l'ensemble des mesures.



La fidélité

Définition : La fidélité est l'aptitude d'un appareil de mesure à donner des mesures exemptes d'erreurs accidentelles.

La fidélité définit la dispersion des résultats. Si on n'effectue qu'une seule mesure, la fidélité représente la probabilité qu'elle soit représentative du résultat moyen. Ce dernier aurait été obtenu en effectuant une infinité de mesures.

Nota : le résultat moyen étant lui-même entaché de l'erreur de justesse.

Si on effectue un ensemble de mesures d'une grandeur G, on obtient une valeur maximum (V_{max}) et une valeur minimum (V_{min}). Les erreurs limites de fidélité sont alors :

$$F_{max} = + \frac{V_{min} + V_{max}}{2}$$

$$F_{min} = - \frac{V_{min} + V_{max}}{2}$$

Exemple :

Des mesures répétées à l'aide d'un voltmètre donnent

$$U_{max} = 100,2V \quad U_{min} = 99,7V \quad F = +/- \frac{100,2 - 99,7}{2} = +/- \frac{0,5}{2} = +/- 0,25V$$

Classification des erreurs de mesure

Erreur systématique;

Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables. Parmi ces erreurs on cite :

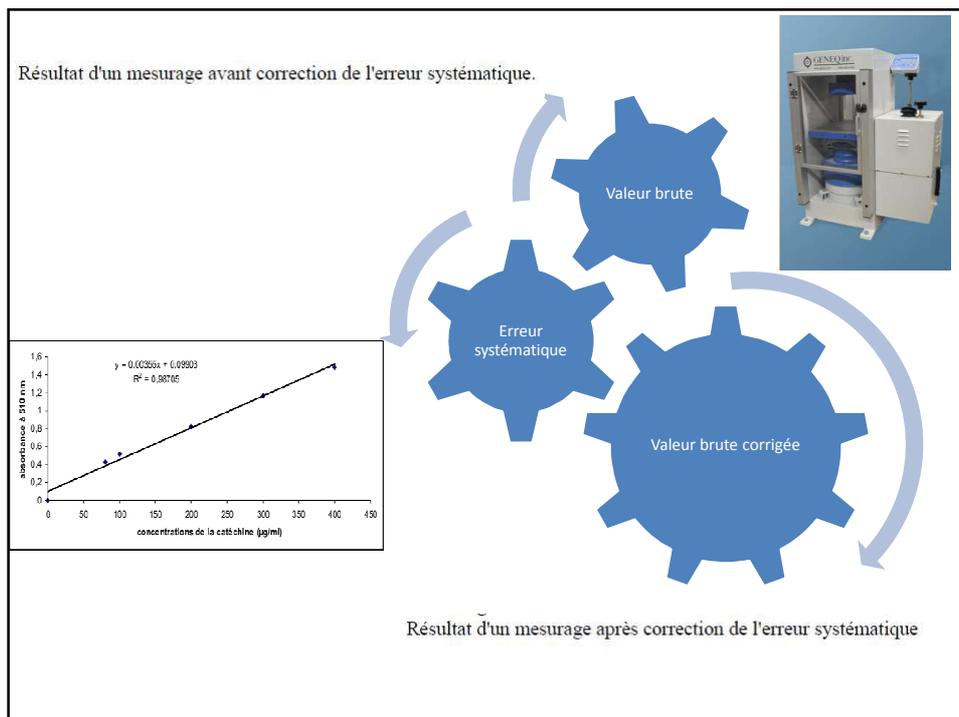
- erreur de zéro (offset),
- L'erreur d'échelle (gain) : c'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.
- L'erreur de linéarité : la caractéristique n'est pas une droite.
- L'erreur due au phénomène d'hystérésis : lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente.
- L'erreur de mobilité : cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.

Correction

Valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur systématique

La correction est égale à l'opposé de l'erreur systématique estimée.

Puisque l'erreur systématique ne peut pas être connue parfaitement, la compensation ne peut pas être complète.



Erreurs aléatoires ou Erreurs fortuites

Une erreur est aléatoire lorsque, d'une mesure à l'autre, la valeur obtenue peut être surévaluée ou sous-évaluée par rapport à la valeur réelle.

La multiplication des mesures va atténuer l'erreur aléatoire.

On admet généralement que l'erreur accidentelle est due à des causes très nombreuses; dans lesquelles l'imperfection des sens de l'opérateur intervient très largement. L'influence de ces causes est faible et s'exerce tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

Exemple :

La mesure du temps avec un chronomètre.
L'erreur vient du temps de réaction de l'expérimentateur au démarrage et à l'arrêt du chronomètre. Comme ce temps de réaction n'est pas toujours le même, la valeur mesurée peut être surévaluée ou sous-évaluée.



Erreurs parasites

Ces erreurs proviennent d'une faute lors de la mesure

Exemple

Confusion entre les chiffres 3 et 8.



Le processus de mesure

- Soit V la valeur vraie
- Le processus de mesure donne en fait $M = V + D + E$
- E = erreur aléatoire (fluctuations) de moyenne nulle et d'écart-type σ
- D = erreur systématique (constante)
- L'incertitude-type est sur $V+D$, ainsi que l'intervalle de confiance !! $V+D$ est la moyenne "théorique" des mesures.
- Les formules classiques d'incertitudes le sont sur la moyenne, incluant l'erreur systématique.
- On ne peut rien faire contre l'erreur systématique sinon étalonner pour corriger.

L'incertitude

Le mot incertitude signifie doute ; l'incertitude du résultat d'un mesurage reflète l'impossibilité de connaître exactement la valeur du mesurande.

Dans cette vision probabiliste de l'erreur, le concept d'incertitude est défini en accord avec cette approche :

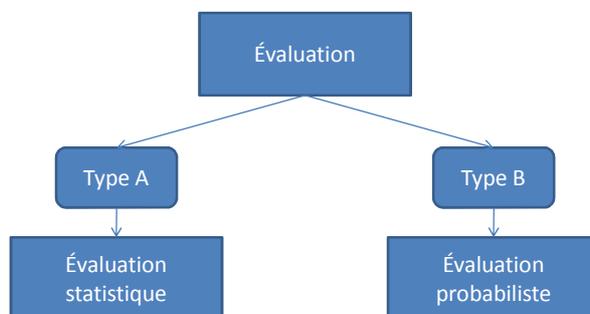
Incertain : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.

2. Différents modes d'évaluation de l'incertitude sur une grandeur

Si on fait varier la totalité des grandeurs dont dépend le résultat d'un mesurage, l'incertitude-type sur chacune des variables peut être évaluée par des moyens statistiques. Cependant, comme cela est rarement possible en pratique, l'incertitude-type sur certaines variables peut être estimée par utilisation d'un modèle probabiliste décrivant la loi de propagation de l'erreur sur cette variable.

Si une grandeur est estimée par des moyens statistiques, on dit qu'on a une évaluation de type A de l'incertitude-type sur cette grandeur.

Si une grandeur est estimée par un modèle probabiliste, on dit qu'on a une évaluation de type B de l'incertitude-type sur cette grandeur.



Incertitudes de type A

Les incertitudes de types A sont utiles quand un grand nombre de mesures sont réalisées. C'est souvent le cas lorsque l'on ne dispose que de peu d'informations sur les sources d'erreurs, puisque celles-ci n'entrent pas en compte dans le calcul. Cela permet d'ignorer l'effet des erreurs aléatoires, dont on estime qu'elles se compensent en moyenne, mais pas les erreurs systématiques, dont il faut toujours tenir compte.

Il s'agit alors d'un simple traitement statistique des erreurs : on calcule l'écart type de la série, ce qui nous donne directement l'incertitude sur la mesure.

Écart type (= incertitude dans le cas d'une estimation de type A) :



Elles se fondent sur l'application de méthodes statistiques à une série de valeurs expérimentales répétées. L'incertitude-type s est alors déterminée à partir du calcul de l'écart-type empirique corrigé dit expérimental :

$$s_{\text{exp}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots \sigma_{n-1} \text{ des calculatrices}$$

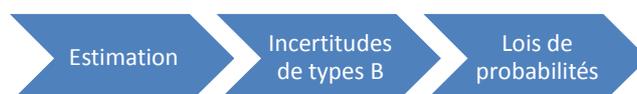
avec \bar{x} moyenne arithmétique : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

et l'incertitude-type s est telle que : $s = \sqrt{\frac{1}{n}} s_{\text{exp}}$.

Souvent il est intéressant d'avoir un intervalle de confiance c'est-à-dire un intervalle pour lequel on a une idée de la fiabilité du résultat. Pour cela, on élargit l'incertitude en lui appliquant un coefficient k . Dans la plupart des cas, ce coefficient vaut 2 si on veut une fiabilité de 95% et 3 pour une fiabilité de 99%. On l'applique aussi régulièrement dans le cas des incertitudes de type B.

Méthodes de type B.

L'incertitude-type est aussi déterminée à partir du calcul d'un écart type mais celui-ci n'est pas calculé sur une série de valeurs, mais il est « estimé » à partir d'informations: expériences, certificat d'étalonnage, classe des instruments, documentation constructeur...

**Choix des composantes de l'incertitude**

Dans la pratique il existe de nombreuses sources possibles d'incertitude dans un mesurage, telle que :

- la définition incomplète du mesurande ;
- un échantillonnage non représentatif ;
- une connaissance insuffisante ou un mesurage imparfait des conditions d'environnement ;
- un biais (dû à l'observateur) dans la lecture des instruments analogiques ;
- la résolution de l'instrument ;
- des valeurs inexactes des étalons et matériaux de référence ;
- des valeurs inexactes des constantes et paramètres retenus (obtenus par des sources extérieures par exemple) ;
- des approximations dans la méthode de calcul des incertitudes ou dans le processus de mesure.

cas	incertitude-type
indicateur numérique	si la résolution est b : $s = \frac{b}{2\sqrt{3}} = \frac{b}{\sqrt{12}}$
lecture d'un indicateur analogique (cadran, réglet...)	$s_{\text{lecture}} = \frac{1 \text{ graduation}}{\sqrt{12}}$
classe d'un instrument	si la classe est définie par $\pm a$: $s = \frac{a}{\sqrt{3}}$
expérience : par exemple : classe de positions x pour la mise au point d'une image sur un banc d'optique	$x_{\min} < x < x_{\max}$; demi-largeur : $a = (x_{\max} - x_{\min})/2$ $s = \frac{a}{\sqrt{3}}$

indication de type c ; $\pm c$ donnée par un constructeur sans autre information	estimation : $s = \frac{c}{\sqrt{3}}$
<i>Ces résultats s'obtiennent à partir des lois de dispersion. Ces incertitudes-types s'ajoutent selon : $s^2 = s_1^2 + s_2^2 \dots$</i>	

❖ **Evaluation d'une incertitude-type de résolution lors d'une pesée**

Une pesée est faite avec une balance numérique de résolution 1 g ($b = 1\text{g}$) c'est-à-dire que lors de la pesée, le dispositif va arrondir le résultat au gramme près.

$$\text{Alors } s = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,3 \text{ g, 1 seul cs : voir remarque qui suit}$$

Remarque : si la masse mesurée est de 112 g et si la résolution est la seule incertitude prise en compte :
 $M = 112,0 \pm 0,6 \text{ g ; } 95 \%$

❖ **Evaluation d'une incertitude-type d'un volume équivalent lors d'un dosage**

Lors d'un dosage colorimétrique l'expérimentateur verse à l'équivalence 15,6 mL de la solution titrante. La détermination de l'équivalence s'effectue à la goutte près (0,04 mL) et la burette utilisée est de classe A ($\pm 0,02 \text{ mL}$).

$$\text{Alors } s_{\text{goutte}} = \frac{0,04}{\sqrt{3}} = 0,023 \text{ mL et } s_{\text{classe}} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ mL}$$

$$\text{Au final, } s_{\text{vol équiv}} = \sqrt{(0,023)^2 + (0,012)^2} = 0,026 \text{ mL et } V_{\text{eq}} = 15,60 \pm 0,06 \text{ mL ; } 95 \%$$

Les jauges

Les calibres tampon

Le contrôle d'alésages et de rainures se fait à l'aide de calibres tampons.

Le côté «entre» doit glisser dans l'alésage par son propre poids et le côté «n'entre pas» ne doit pas entrer.

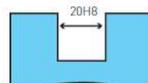
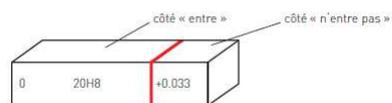
Les cylindres de contrôle sont durcis (diminution de l'usure).

Le calibre du côté «n'entre pas» est souvent plus court, il est marqué en rouge et la limite supérieure de l'écart est inscrite.



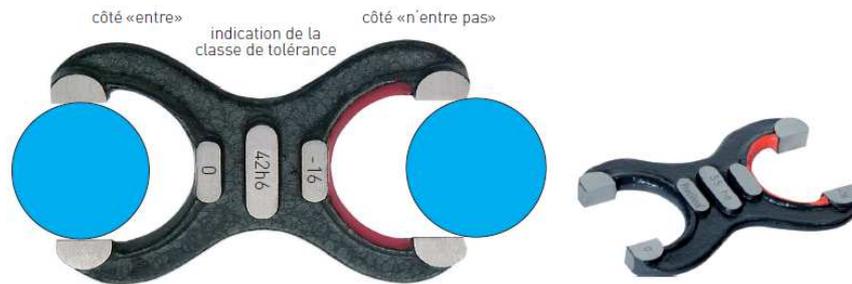
Les jauges plates

Pour le contrôle de rainures, on utilise des tampons limites.



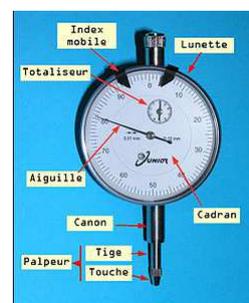
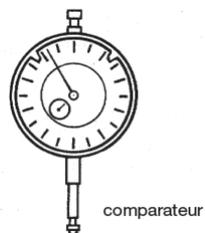
Les calibres à mâchoires

Pour le contrôle du diamètre ou de l'épaisseur d'une pièce, on utilise les calibres mâchoires.
Le côté «entre» doit glisser sur la section à contrôler par son propre poids et représente la valeur maximale admise.
Le côté «n'entre pas» ne doit que mordiller. Il est en dessous de la tolérance minimale et est marqué avec la limite inférieure de l'écart. Ses mâchoires sont chanfreinées et marquées en rouge.



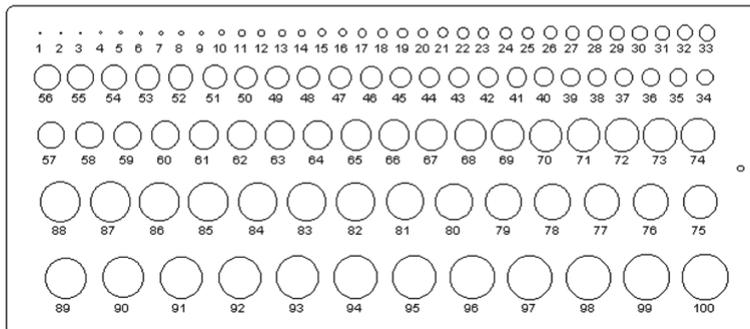
Jauge d'épaisseur

Une jauge d'épaisseur ou "Cale" est un outil ou instrument de mesure simple permettant de mesurer, ou plutôt d'estimer, l'espacement entre deux pièces mécaniques, communément appelé jeux.



Les jauges à trou (calibres de perçage)

Avec ces jauges, il est possible de contrôler et de trier des mèches et des forets hélicoïdaux ainsi que du fil d'acier. On cherche le trou dans lequel le foret ou le fil d'acier entre, puis on lit la valeur indiquée sur la jauge.



PRINCIPE DE LA LECTURE

VIS au PAS de 0,5 mm :

Le tambour est gradué en 50 parties égales.
 Chaque partie représente une lecture de 1/100^e de mm.
 Il faut donc tourner le tambour de 2 tours pour que la touche mobile se déplace de 1 mm.
 De 1 à 49 centièmes, la lecture est directe.
 de 51 à 99 centièmes, il aura fallu ajouter 1 demi millimètre visible sur le manchon pour obtenir la valeur exacte.
 Nous voyons donc que la lecture au micromètre présente une particularité demandant une certaine attention pour ne pas commettre d'erreur.

$7,5 + 0,18 = 7,68 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$

