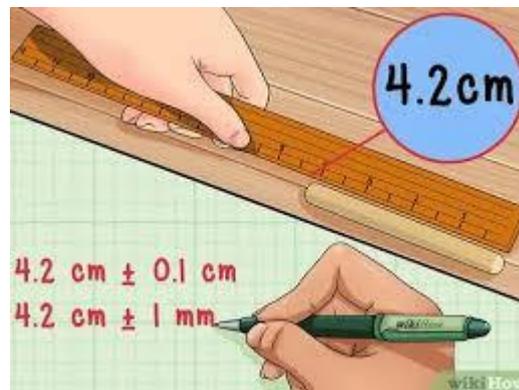


## GÉNÉRALITES SUR LES MESURES EN SCIENCES PHYSIQUES



Le but de la majorité des expériences en physique consiste à comprendre un phénomène et à le modéliser correctement. Nous effectuons des mesures et nous avons souvent à nous poser la question: “ quelle est la valeur de telle ou telle grandeur ? ”, parfois sans nous demander préalablement si cette formulation est correcte et si nous serons capables de trouver une réponse.

La nécessité de cette interrogation préalable devient évidente dès qu'on mesure la même grandeur plusieurs fois. L'expérimentateur qui le fait est fréquemment confronté à une situation assez intéressante : s'il utilise des appareils suffisamment précis, il s'aperçoit que des mesures répétées de la même grandeur donnent parfois des résultats qui sont un peu différents de celui de la première mesure. Ce phénomène est général, que les mesures soient simples ou sophistiquées. Même les mesures répétées de la longueur d'une tige métallique peuvent donner des valeurs différentes. La répétition de l'expérience montre que, d'une part, les résultats sont toujours un peu différents et, d'autre part, cette différence n'est en général pas très grande.

Dans la plupart des cas, on **reste proche d'une certaine valeur moyenne**, mais de temps en temps on trouve des valeurs qui sont différentes de celle-ci. Plus les résultats sont éloignés de cette moyenne, plus ils sont rares [1].

### 1. Grandeur physique mesurable

Les sciences physiques sont des sciences expérimentales. Elles visent à décrire les phénomènes tant qualitativement que quantitativement en s'appliquant notamment à les caractériser par des grandeurs mesurables.

Mesurer une grandeur consiste à la comparer à une grandeur de même espèce, prise pour unité. En pratique, cela nécessite la mise en oeuvre de dispositifs expérimentaux (instruments, appareillage de mesure, montage, etc.) et de procédés ou de méthodes de mesures appropriées. Le résultat de la mesure ou valeur quantitative obtenue, s'exprime par un nombre concret, suivi du nom ou du symbole d'une unité de mesure (exemple : 15.7Kg ; 134cm ; 4.5mA) [2].

### 2. Mesure directe et indirecte

Dans certaines situations expérimentales, les grandeurs sont mesurées directement (exemple : mesure de la masse d'un corps à l'aide d'une balance, mesure de la distance à l'aide d'une règle

graduée, de température, etc.). Dans d'autres situations, la mesure se fait indirectement, les grandeurs concernées sont déduites par le calcul, à partir de la mesure d'autres grandeurs (exemple : mesure d'une masse volumique, d'une concentration, d'une vitesse, d'une puissance, etc.)

### 3. Caractère incertain d'une mesure

La mesure d'une grandeur physique, directe ou indirecte ; est toujours entachée d'une certaine indétermination ou incertitude, due au fait que la mesure ne peut être parfaitement exempte d'erreurs. Les causes d'incertitudes tiennent principalement aux éléments suivants : l'opérateur (erreur humaine), l'instrument, la méthode et l'environnement de la mesure. On classe en général les incertitudes en deux catégories, selon les types d'erreurs suspectées (erreurs « systématiques » ou « accidentelles ou aléatoires »). Ceci facilite à la fois l'estimation, la réduction ou l'élimination des causes éventuelles correspondantes (voir tableau 1).

Tableau 1: Typologie des incertitudes de mesure

	Origine-Causes	Caractéristiques	Traitement
Incertaines accidentelles (aléatoires)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inexpérience, distraction ou négligence de l'opérateur.</li> <li>• Phénomènes perturbateurs extérieurs (humidité, température, pression, etc.)</li> <li>• Nature du phénomène physique étudié (exemple suggestif de la radioactivité)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractère aléatoire,</li> <li>• Répartition statistique des valeurs mesurées autour de la valeur vraie de la grandeur mesurée.</li> <li>• Valeur variable, imprévisible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Répéter plusieurs fois la mesure.</li> <li>• Prendre comme valeur mesurée, la moyenne arithmétique des résultats.</li> <li>• Traitement statistique élémentaire ou élaboré si nécessaire</li> </ul>
Incertaines systématiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erreur de parallaxe, défaut de réglage du zéro de l'instrument de mesure.</li> <li>• Vieillesse des composants, dégradation des traits de graduation, etc.</li> <li>• Procédé de mesure inadapté.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur fixe en signe et en grandeur.</li> <li>• Difficilement détectables par une simple répétition de la mesure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etude critique des méthodes expérimentales utilisées.</li> <li>• Etalonnage périodique des instruments de mesure.</li> <li>• Reprise de la mesure avec un autre appareil ou un autre procédé de mesure.</li> </ul>

### 4. Notions d'erreur et d'incertitude

Il est fondamentalement impossible de trouver la valeur exacte d'une grandeur physique. En effet, pour chaque mesure, nous utilisons nos organes des sens et des appareils de mesure dont la sensibilité, aussi bonne soit-elle, est limitée. Nous devons donc savoir jusqu'à quel point nous pouvons nous fier à un résultat ; il importe de connaître la précision d'une mesure. On appelle erreur sur une mesure la différence entre la valeur obtenue (valeur mesurée) et la valeur réelle (valeur exacte) [3].

Erreur = valeur mesurée – valeur exacte

- L'**erreur de mesure** est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie (inconnue) ou une valeur de référence.



-L'**incertitude absolue** :  $\Delta x$ , est une estimation de l'erreur que fait l'expérimentateur. L'incertitude absolue est l'écart maximum possible entre la mesure  $x$ , et la valeur exacte. Elle s'exprime dans les unités de la grandeur mesurée.

- L'**incertitude relative** :  $\Delta x/x$  représente l'importance de l'erreur par rapport à la grandeur mesurée.

L'incertitude relative n'a pas d'unités et s'exprime en général en % ( $100\Delta x/x$ ). C'est une manière commode de chiffrer la précision d'une mesure.

Cette erreur peut provenir de différentes causes que l'on classe en deux familles : des erreurs systématiques (effets identiques si la mesure est répétée de manière identique) et des erreurs aléatoires (effets non-répétables) [2].

## 5. Traitement scientifique des incertitudes expérimentales

### 5.1 Notion d'erreur et d'incertitude absolue et relative

Lorsqu'on mesure une grandeur physique  $G$ , dans une situation expérimentales donnée, la valeur quantitative obtenue ( $g_{mes}$ ) ne peut être considérée que comme une valeur approchée de la valeur réelle ou vraie ( $g$ ) de cette grandeur, cette dernière ne pouvant foncièrement être connue.

L'incertitude absolue représente une estimation raisonnée de la limite supérieure de l'erreur absolue ( $g - g_{mes}$ ) pouvant affecter la mesure effectuée. Elle correspond à un nombre concret (positif), exprimé dans une unité de la grandeur visée. Connaissant l'incertitude absolue  $\Delta g$  associée à la valeur mesurée  $g_{mes}$  d'une grandeur ( $G$ ), il est possible d'encadrer la valeur « réelle » de celle-ci (voir encadré cidessous):

$$|g - g_{mes}| \leq \Delta g$$

$$g_{mes} - \Delta g \leq g \leq g_{mes} + \Delta g$$

Ou  $g = g_{mes} \pm \Delta g$

A titre d'illustration, si la mesure de la température d'un corps donné fournit comme valeur mesurée (approchée donc) égale à  $37.2^{\circ}\text{C}$  (degré Celsius) et qu'on estime qu'avec l'instrument utilisé, l'erreur absolue ne dépasse pas  $0.2^{\circ}\text{C}$ , l'encadrement de la valeur réelle de la température visée sera :

$$37.2-0.2 \leq T \leq 37.2+0.2 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Soit :  $37.0 \leq T \leq 37.4 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$

Ou bien :  $T = 37.2 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

La connaissance de l'incertitude absolue avec la valeur de la grandeur mesurée, exprimée par le rapport  $\Delta g/g$  (appelé « incertitude relative »), permet de mieux apprécier l'approximation ou la précision de la mesure. Il s'agit d'un nombre abstrait (sans unité), présenté souvent en %



$$\left[ \left( \frac{\Delta g}{g} \right) \cdot 100 \right]$$

Dans l'exemple précédent, la précision de la mesure est de :  $\Delta T/T = 0.2/37.2 = 0.00537 = 0.005$  ou 0.5%. Avec une valeur mesurée d'ordre de grandeur plus faible, 2.6°C par exemple, la même procédure de mesure donnerait une incertitude relative plus importante ( $0.2/2.6 = 0.076 = 0.8$ ), ou bien 8%, ce qui correspond à une précision de mesure moins bonne.

## 5.2 Estimation et calcul des incertitudes

- Cas d'une mesure directe unique (voir exemple précédent).
- Cas d'une mesure directe répétée.

L'incertitude absolue peut être évaluée dans ce cas, en déterminant la valeur maximale des écarts ( $g_{mes} - g_{moy}$ ) des valeurs mesurées, par rapport à la valeur moyenne de celles-ci. A ce propos, considérons comme exemple, la mesure répétée de la masse  $m$  d'un corps avec une balance de sensibilité (incertitude systématique d'instrument) estimée à 0,5g, avec comme résultat de série de 4 valeur expérimentales (voir tableau 2). On en déduit par un calcul élémentaire une estimation de l'incertitude absolue de type « accidentel », associable à la mesure effectuée, soit  $m_{acc} = |-1.6| = 1.6g$

Exemple de mesure directe répétitive

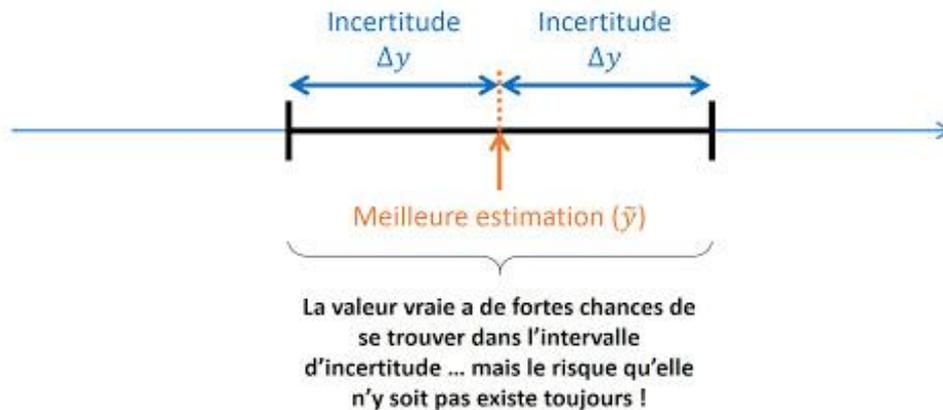
Masse du corps (g)	1 <sup>er</sup> mesure	2 <sup>ème</sup> mesure	3 <sup>ème</sup> mesure	4 <sup>ème</sup> mesure	Mesure <sub>moy</sub>
	36.7	35.2	37.4	38.0	36.8
Ecart ( $m_{mes} - m_{moy}$ )	-0.1	-1.6	+0.6	+1.2	

Il est évident que la détermination de l'incertitude absolue sur un résultat expérimental doit prendre en compte toutes les incertitudes, systématiques et/ou accidentelles, associées à la mesure.

Ainsi concernant l'exemple précédent, on aura :  $\Delta m = \Delta m_{acc} + \Delta m_{sys} = 1.6g + 0.5g = 2.1g$ .

Résultat expérimental = meilleure estimation + incertitude

$$y = \tilde{y} + \Delta y$$



### Cas d'une mesure indirecte

Si on détermine la valeur d'une grandeur à partir de quantités mesurées, le calcul de l'incertitude correspondante peut être conduit de plusieurs façons : méthode des extrêmes, méthode des dérivées partielles, de la différentielle logarithmique, etc.

	$g=f(a,b)$	$\Delta g$	$\Delta g/g$
<b>Somme, Différence</b>	$a \pm b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a \pm b}$
<b>Produit</b>	$a \times b$	$a\Delta b + b\Delta a$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
<b>Quotient</b>	$\frac{a}{b}$	$\frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
<b>Puissance</b>	$a^n$	$na^{n-1}\Delta a$	$n \frac{\Delta a}{a}$

### Méthode des dérivées partielles

Supposons que  $g$  dépend de plusieurs grandeurs  $a, b, c$ , mesurées avec les incertitudes  $\Delta a, \Delta b, \Delta c$  :

$g=f(a, b,c)$  L'incertitude sur  $g$  est :

$$\Delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial g}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial g}{\partial c} \right| \Delta c$$



## Référence :

[1] R. DUPERRAY. *Formation Expérimental. PTSI*

[2] Université Ferhat Abbas-Faculté des sciences-Dép.de physique-1ère année Licence LMD, sciences de la matière-

[3] L. BOUFATAH. Introduction aux travaux pratiques de physique. Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques de Tlemcen