# CHAPITRE II

## Système international d'unités (si)

# CHAPITRE II
# SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES (SI)

## I. DEFINITIONS

### I.1. Définition d'un système d'unités

Un système d'unités de mesure est défini par un choix conventionnel de grandeurs de base auxquelles sont associées des unités.

**Exemple :**

**a. Système CGS (trois grandeurs et unités)**

Le système CGS fut proposé par la British Association for the Advancement of Science en 1874. Il fut utilisé en science jusqu'au milieu du 20e siècle.

- grandeurs de base : longueur, masse, temps
- unités : centimètre, gramme, seconde

**b. Système MKSA ou de GIORGI (quatre grandeurs et unités)**

En 1946 le Comité international des poids et mesures approuve le système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère). De nos jours le Système international d'unités retient sept unités de base.

- grandeurs de base : longueur, masse, temps, intensité électrique
- unités : mètre, kilogramme, seconde, ampère.

**c. Système SI (sept grandeurs et unités)**

- grandeurs de base : longueur, masse, temps, intensité électrique, température thermodynamique, quantité de matière, intensité lumineuse
- unités : mètre, kilogramme, seconde, ampère, kelvin, mole, candela

### I.2. Définition d'un système cohérent d'unités

Un système d'unités sera dit cohérent s'il est composé :

- d'unités de base choisies arbitrairement.
- d'unités dérivées déduites des unités de base à l'aide de formules traduisant les lois physiques et où les coefficients numériques de proportionnalité, sont par convention, pris égaux à 1.

**Exemple:**

Dans le Système International (SI) nous avons:

Unités de base: - le mètre (m) pour la longueur (l) - la seconde (s) pour le temps (t)

Unités dérivées : la vitesse exprimée en : mètre par seconde conduit à la relation v=l/t où le facteur de proportionnalité est l. kilomètre par heure, fait intervenir un facteur de conversion 3.6 car 1m/s=3.6 km/h et conduit donc à une perte de cohérence du système d'unités.

### I.3. Définition de l'Unité légale

Une unité est légale lorsque sa définition et son emploi font l'objet d'un décret gouvernemental.

**Exemple:**

La 11$^{ème}$ CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) adopte en 1960 le Système International d'unités(SI). Les six unités du SI (mètre, kilogramme, seconde, ampère, kelvin et candela) ont été définies par le décret du 3 mai 1961 et sont légales en France depuis le 1er janvier 1962. L'évolution des techniques en métrologie, amène à redéfinir certaines unités de base et depuis 1983 le mètre fait référence à la vitesse de la lumière dans le vide, dont la valeur numérique fut fixée par décret à $c$ =299792458 m/s.

## II. LE SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES

Le **Système international d'unités** (abrégé en **SI**), inspiré du **système métrique**, est le système d'unités le plus largement employé au monde (sauf aux États-Unis, au Liberia et en Birmanie). Il s'agit d'un système décimal (on passe d'une unité à ses multiples ou sous-multiples à l'aide de puissances de 10) sauf pour la mesure du temps et d'angle. C'est la Conférence générale des poids et mesures, rassemblant des délégués des États membres de la Convention du Mètre, qui décide de son évolution, tous les quatre ans, à Paris. L'abréviation de « Système international » est SI, quelle que soit la langue utilisée. Le Système International d'Unités a pour objet une meilleure uniformité et compréhension mutuelle dans l'usage général.

Le Système International d'unités, appelé SI, est un système cohérent d'unités, adopté par la 11e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1960.

### II.1. Unités de bases

Les unités de base du système SI sont au nombre de sept, elles doivent être considérées comme indépendantes au point de vue dimensionnel. Le tableau ci-dessous donne ces unités de base avec leur nom et leur symbole; elles sont mises en vis-à-vis de la grandeur physique qu'elles servent à mesurer, et de leur dimension (Tableau II.1).

| Grandeur | Symbole de la grandeur | Symbole de la dimension | Nom de l'unité | Symbole associé à l'unité |
|---|---|---|---|---|
| Longueur | l,x,r | L | Mètre | M |
| Masse | m | M | Kilogramme | Kg |
| Temps | t | T | Seconde | S |
| Courant électrique | I, i | I | Ampère | A |
| Température thermodynamique | T | θ | Kelvin | K |
| Quantité de matière | n | N | Mole | Mol |
| Intensité lumineuse | $I_V$ | J | Candela | Cd |

**Tableau II.1 :** Unité de bases du système international SI

### II.1.1. Unité de longueur (Le mètre symbole : m)

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/2997992458 de seconde (Définition de la 17ème CGPM de 1983) .

### II.1.2. Unité de masse ( Le kilogramme symbole : kg)

Le kilogramme est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. (Définition de la 1re CGPM de 1889 et de la 3ème CGPM de 1901).

### II.1.3. Unité de temps (La seconde symbole : 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 du césium 133. (Définition de la 13ème CGPM de 1967).

### II.1.4. Unité de courant électrique ( L'ampère symbole : A)

L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux circuits 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 2.10−7 Newton par mètre de longueur. (Définition du CGPM en 1946 et approuvée par la 9ème CGPM de 1948).

### II.1.5. Unité de température thermodynamique (Le kelvin symbole: K)

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau (273.16 °K ou 0.01°C). La 13ème CGPM (résolution 3) décide aussi que l'unité de kelvin et son symbole K sont utilisés pour exprimer un intervalle ou une différence de température. Définition de la 13ème CGPM de 1967

**Remarque**

En dehors de la température thermodynamique (symbole : T) exprimée en kelvins, on utilise aussi la température Celsius (symbole C°) définie par l'expression : C=T-T0 ;

Avec : T0 = 273, 15 °K par définition.

### II.1.6. Unité de quantité de matière (La mole symbole :mol)

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 grammes de carbone 12. (Définition de la 14ème CGPM de 1971).

**Remarque**

Lorsqu'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 spécifiques de telles particules.

### II.1.7. Unité d'intensité lumineuse (La candela symbole : cd)

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian. Définition de la 16$^{ème}$ CGPM de 1979

**Remarque :**

**CGPM :** Conférence Générale des Poids et Mesures qui a lieu tous les 4 ans composée par les représentant des états membres de la convention du mètre (voir http ://www.bipm.org/)

### II.2. Unités supplémentaires

A côté de ces unités de base et des unités dérivées, il existe des unités supplémentaires, au nombre de deux:

- L'unité d'angle plan : le radian (symbole : rad) ; le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale a celle du rayon,
- L'unité d'angle solide : le stéradian (symbole : sr) ; le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale a celle d'un carre ayant pour cote le rayon de la sphère.

Les grandeurs d'angle plan et d'angle solide doivent être considérées comme des unités dérivées sans dimension qui peuvent être utilisées ou non dans les expressions des autres unités dérivées.

| **Grandeur** | **Nom** | **Symbole** |
|---|---|---|
| Vitesse angulaire | Radian par seconde | $Rad.s^{-1}$ |
| Accélération angulaire | Radian par seconde carrée | $Rad.s^{-2}$ |
| Intensité énergétique | Watt par stéradian | $W.sr^{-1}$ |
| Luminance énergétique | Watt par mètre carré stéradian | $W.m^{-2}.sr^{-1}$ |

**Tableau II.2 :** Unités en système international (SI)

### II.3. Unités dérivées :

Les unités dérivées sont des unités qui peuvent être exprimées à partir des unités de base au moyen des symboles mathématiques de multiplication et de division.

Certaines unités dérivées ont reçu des noms spéciaux et des symboles particuliers qui peuvent eux-mêmes être utilisés avec les symboles d'autres unités de base ou dérivées pour exprimer les unités d'autres grandeurs.

➢ **Dix-neuf d'entre elles ont reçu des noms et des symboles spéciaux :**

| **Grandeurs dérivée** | | **Unités dérivée** | | **Dimension** |
|---|---|---|---|---|
| **Nom** | **Symbole** | **Nom** | **Symbole** | |
| Fréquence | $f, \nu$ | hertz | Hz | $T^{-1}$ |
| Force - Poids | $F, G$ | newton | N | $LMT^{-2}$ |
| Pression - Contrainte | $p, \tau, \sigma$ | pascal | Pa | $L^{-1}MT^{-2}$ |
| Travail – Energie/Quantité de chaleur | $W, E, Q$ | joule | J | $L^2MT^{-2}$ |
| Puissance | $P$ | watt | W | $L^2MT^{-3}$ |
| Quantité d'électricité /Charge électrique | $Q$ | coulomb | C | TI |
| Différence de potentiel électrique | $E, V, U$ | volt | V | $L^2MT^{-3}I^{-1}$ |
| Capacité électrique | $C$ | farad | F | $L^{-2}M^{-1}T^4I^2$ |
| Résistance électrique (Réactance, Impédance) | $R$ | ohm | Ω | $L^2MT^{-3}I^{-2}$ |
| Conductance électrique | $G$ | siemens | S | $L^{-2}M^{-1}T^3I^2$ |
| Flux d'induction magnétique | $\Phi$ | weber | Wb | $L^2MT^{-2}I^{-1}$ |
| Induction magnétique | $B$ | tesla | T | $MT^{-2}I^{-1}$ |
| Induction électrique | $L, M$ | henry | H | $L^2MT^{-2}I^{-2}$ |
| Température Celsius | $t, \theta$ | degré Celsius | °C | $\Theta$ |
| Flux lumineux | $\Phi, F$ | lumen | lm | JΩ |
| Eclairement lumineux | $E$ | lux | lx | $L^{-2}$JΩ |
| Activité radioactive | $A$ | becquerel | Bq | $T^{-1}$ |
| Dose absorbée | $D$ | gray | Gy | $L^2T^{-2}$ |
| Equivalent de dose | $H$ | sievert | Sv | $L^2T^{-2}$ |

Tableau II.3 : Unités dérivées reçu des noms et des symboles spéciaux

➢ **Unités dérivées des unités de base et des unités supplémentaires :**

| **Grandeur** | **Formule de définition** | **Unités SI** | **Symbole** |
|---|---|---|---|
| volume | $V = l^3$ | mètre cube | $m^3$ |
| masse volumique | $\rho = m/v$ | kilogramme par mètre cube | $kg{\cdot}m^{-3}$ |
| vitesse angulaire | $\omega = \alpha/t$ | radian par seconde | $rad{\cdot}s^{-1}$ |
| moment d'inertie | $J = ml^2$ | kilogramme mètre-carré | $kg{\cdot}m^2$ |
| moment cinétique | $L = J\omega$ | kilogramme mètre-carré radian par seconde | $kg{\cdot}m^2 \cdot rad{\cdot}s^{-1}$ |
| densité de courant | $j = i/s$ | ampère par mètre-carré | $A{\cdot}m^{-2}$ |
| concentration molaire | $c = n/v$ | mole par mètre-cube | $mol{\cdot}m^{-3}$ |

Tableau II.4 : Unités dérivées des unités de base et des unités supplémentaires

➢ **Unités dérivées des unités de base, des unités supplémentaires et des unités de noms spéciaux :**

| Grandeur | Formule de définition | Unités SI | Symbole |
|---|---|---|---|
| moment d'une force | $\Gamma = fl$ | newton-mètre | $N{\cdot}m$ |
| champ électrique | $E = \frac{f}{q}$ | volt par mètre | $V{\cdot}m^{-1}$ |
| conductivité | $\gamma = \frac{1}{\rho}$ | siemens par mètre | $S{\cdot}m^{-1}$ |
| entropie | $S = \int \frac{dQ}{T}$ | joule par kelvin | $J{\cdot}K^{-1}$ |
| conductivité thermique | $\lambda = \frac{Pl}{S\Delta T}$ | watt par mètre - kelvin | $W{\cdot}m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| luminance | $L = \frac{d\phi}{d\Omega dS\, cos\theta}$ | watt par mètre carré - stéradian | $W{\cdot}sr^{-1} \cdot m^{-2}$ |
| coefficient de compressibilité volumique. | $\alpha = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dP}$ | pascal à la puissance moins un | $Pa^{-1}$ |
| coefficient de pression | $\beta = \frac{\partial p}{\partial T}$ | pascal par kelvin | $Pa{\cdot}K^{-1}$ |

Tableau II.4 : Unités dérivées des unités de base, des unités supplémentaires et des unités de noms spéciaux

➢ **Autres unités employées :** Liens entre les unités S.I. et celles employées dans d'autres pays (USA)

- **Distance:**

✓ pouce (inch) : 1 in = 2,54 cm
✓ pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30,48 cm
✓ mile (miles) = 5280 ft = 1,609 km
✓ mille nautique (mn) = 1,852 km

- **Volume:**

✓ pinte (pint) = 0,94 L
✓ gallon (US gallon) : 1 USgal = 4 pintes = 3,786 L
✓ baril (US barrel) : 1 bbi = 42 USgal = 159 L
✓ 1 $m^3$ = 1000 L ;
✓ 1 $dm^3$ = 1 L ;

- **Masse:**

✓ once (ounce) : 1 oz = 28,35 g
✓ livre (pound) : 1 lb = 0,454 kg

- **Puissance:**

✓ cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0,736 kW = 1 CV

- **Divers :**

✓ 1 ha = 10 000 $m^2$
✓ 1 h = 3600 s
✓ 1 noeud (kt) = 1,852 km/h

## II.4. Formation des multiples et sous-multiples

Lorsqu'une unité s'avère trop grande ou trop petite, pour l'emploi envisagé, on utilise des multiples ou des sous-multiples exclusivement décimaux. Ils sont obtenus en joignant un préfixe choisi au nom de l'unité.

| **Multiples** | | | **Sous multiples** | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Facteur** | **Préfixe** | **Symbole** | **Facteur** | **Préfixe** | **Symbole** |
| $10^{24}$ | Yotta | Y | $10^{-24}$ | yocto | y |
| $10^{21}$ | Zetta | Z | $10^{-21}$ | zepto | z |
| $10^{18}$ | Exa | E | $10^{-18}$ | atto | a |
| $10^{15}$ | Péta | P | $10^{-15}$ | femto | f |
| $10^{12}$ | Téra | T | $10^{-12}$ | pico | p |
| $10^{9}$ | Giga | G | $10^{-9}$ | nano | n |
| $10^{6}$ | Méga | M | $10^{-6}$ | micro | µ |
| $10^{3}$ | Kilo | K | $10^{-3}$ | milli | m |
| $10^{2}$ | Hecto | h | $10^{-2}$ | centi | c |
| $10^{1}$ | Déca | da | $10^{-1}$ | déci | d |

**Tableau II.5 :** Liste des multiples et sous multiples

Les noms et les symboles des multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse sont formés par l'adjonction de noms de préfixes au mot 'gramme' et de symboles de ces préfixes au symbole de l'unité 'g'.

## II.5. Dimensions d'une grandeur physique

A partir des grandeurs physiques fondamentales, on peut donc définir d'autres grandeurs à partir d'elles. En voici quelques exemples :

$$vitesse = \frac{distance}{temps}$$

La vitesse est homogène à une distance divisée par un temps. Sa dimension est une distance divisée par un temps. Les quatre dimensions fondamentales se notent : L, T, M et I. La dimension d'une grandeur X est noté **[X]**.

Pour trouver la dimension d'une grandeur dérivée, on exprime la relation de cette grandeur en fonction de grandeurs de base. L'expression qui permet d'exprimer la dimension $G$ en fonction des grandeurs fondamentales est appelé une équation de dimension : $G = L^{\alpha}M^{\beta}T^{\gamma}I^{\delta}$

**Exemples :**

Une force F s'exprime en newtons. Si on revient aux trois unités de base du système SI (masse, longueur, temps) la force *F*, d'après la formule $F = m.\gamma$ est égale à une masse multipliée par une accélération $\gamma$.

L'accélération $\gamma$ est égale à une longueur divisée par un temps au carré ($\gamma = \frac{mètre}{seconde^2}$) . On dit alors que les dimensions de la force sont 1 par rapport à la masse, 1 par rapport à la longueur et -2 par rapport au temps et on écrit symboliquement: $F = MLT^{-2}$.

- $[v] = LT^{-1}$ unité : $m.s^{-1}$
- $[a] = LT^{-2}$ unité : $m.s^{-2}$
- $[f] = MLT^{-1}$ unité : $kg.m.s^{-2} = N$
- $[W] = ML^2T^{-2}$ unité : $kg.m^2.s^{-2} = N.m = J$

| Grandeur | Dimensions | Grandeur | Dimensions |
|---|---|---|---|
| Longueur | L | Accélération | $LT^{-2}$ |
| Masse | M | Force | $MLT^{-2}$ |
| Temps | T | Travail, énergie | $ML^2T^{-2}$ |
| Surface | $L^2$ | Puissance | $ML^2T^{-3}$ |
| Volume | $L^3$ | Tension | $ML^2T^{-3}I^{-1}$ |
| Pression | $ML^{-1}T^{-2}$ | Fréquence | $T^{-1}$ |
| Vitesse | $LT^{-1}$ | | |

**Tableau II.6 :** Homogénéité des unités d'un résultat

**II.6. Homogénéité d'une équation (d'un résultat)**

Les grandeurs A et B sont dites homogènes s'il existe un réel α tel que : $A = \alpha \cdot B$. Ces grandeurs ont alors même dimension. Pour une relation il faudra toujours que son premier membre ait les mêmes dimensions que le second : on dira qu'elle est homogène.

Dans un problème, avant de trouver le résultat avec des nombres (application numérique) il faut le trouver avec des lettres représentant les différentes grandeurs (expression littérale). On peut alors vérifier si l'expression trouvée est homogène, c'est-à-dire si les deux membres ont les mêmes dimensions. Ceci permet de savoir si la formule trouvée est possible ou non, ou bien de trouver l'unité d'une grandeur si on connaît celles des autres.

Les équations dimensionnelles sont un outil très puissant : si deux grandeurs physiques ont les mêmes grandeurs physiques, alors, c'est la même grandeur.

**Exemple :**

$$[W] = [fl] = M\,L\,T^{-1} \times L = M\,L^2\,T^{-2}$$

$$[E] = \left[\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2\right] = M \cdot [v^2] = M\,L^2\,T^{-2}$$

Ces deux grandeurs sont donc identiques.

## II.6. Différentes méthodes de mesure

Une mesure est caractérisée par un nombre et une unité. Cette unité est une grandeur de référence appelée « étalon ». Pour mesurer une distance on peut prendre n'importe quel objet comme étalon. Cependant, pour des raisons pratiques, on utilise une unité internationale qu'est le mètre.

NB : Dans tout résultat il est donc essentiel d'indiquer quelle est l'unité de mesure utilisée.

### II.6.1. Mesure directe

On appelle « mesure directe » un résultat qui est obtenu directement à partir d'un instrument de lecture. La mesure d'une longueur avec une règle, la mesure de la tension avec un voltmètre ou la mesure de la vitesse avec un tachymètre sont toutes des mesures directes.

### II.6.2. Mesure indirecte

On appelle « mesure indirecte » un résultat obtenu par un calcul. Par exemple, si nous ne disposons pas de tachymètre (odomètre) pour mesurer directement la vitesse d'un véhicule, on peut alors mesurer la distance parcourue et le temps nécessaire pour parcourir cette distance et par la suite calculer la vitesse. L'aire d'une surface carrée est obtenue par le produit de la longueur de ses côtés serait aussi une mesure indirecte.

### II.6.3. Erreurs

Lorsqu'on effectue la mesure de la largeur d'une feuille de papier, on sait que le résultat obtenu ne représente pas exactement la véritable largeur de cette feuille : on commet alors une certaine erreur sur le résultat.

**L'erreur** est la différence entre la valeur vraie d'une grandeur et la valeur de cette mesure. Étant donné que nous ne connaissons pas la valeur vraie d'une mesure, il nous est impossible de déterminer l'erreur commise. Nous pouvons cependant savoir quelle est l'erreur maximale qu'on peut commettre sur cette mesure : c'est ce que nous appelons l'incertitude.

## II.7. Représentation des résultats

### II.7.1. Chiffres significatifs

#### a) Nombre de chiffres significatif d'un résultat numérique

Dans un résultat numérique, tous les chiffres autres que zéro sont significatifs. Les zéros sont significatifs lorsqu'ils se trouvent entre d'autres chiffres ou à leur droite ; ils ne le sont pas lorsqu'ils se trouvent à gauche. Exemples :

- 3,2 contient 2 chiffres significatifs ;
- 3,20 contient 3 chiffres significatifs ;
- 0,32 contient 2 chiffres significatifs ;
- 3200 contient 4 chiffres significatifs ;

Signalons qu'un nombre entier naturel est considéré comme possédant un nombre illimité de chiffres significatifs ; il en est de même de son inverse.

#### b) Précision d'un résultat numérique

La précision d'un résultat numérique augmente avec le nombre de chiffres significatifs exprimé. Le dernier chiffre est alors incertain.

**Exemples :**

- $L = 12,597$ km $= 12,597.10^3$ m (5 chiffres significatifs) signifie que
$$12596,5 \text{ m} < L < 12597,5 \text{ m} ;$$
- $L = 12,60$ km $= 12,60.10^3$ m (4 chiffres significatifs) signifie que
$$12595 \text{ m} < L < 12605 \text{ m} ;$$
- $L = 12,6$ km $= 12,6.10^3$ m (3 chiffres significatifs) signifie que
$$12550 \text{ m} < L < 12650 \text{ m} .$$

### II.7.2. Chiffres significatifs et opérations

Il faut toujours arrondir le résultat final fourni par la calculatrice afin de l'exprimer avec une précision égale à celle de la donnée utilisée la moins précise. Par exemple, le résultat de la multiplication : 36.54x58.4=2133.936 doit être arrondi à $2.13\text{x}10^3$.

Car la donnée la moins précise (58.4) contient 3 chiffres significatifs. De même, après une addition ou un soustraction, le résultat ne doit pas avoir plus de décimales que le nombre qui comporte le moins :

**Exemple :**

220.2+968.114-12.51=1175.804

La valeur 1175.804 doit être arrondi à : 1175.8

### II.7.3. Calculs classiques d'incertitude

#### a) Méthode

- Soit une grandeur $A = f(x, y, z)$ où $x$, $y$ et $z$ représentent les mesures primaires. L'incertitude sur la grandeur $A$ peut être exprimée en donnant :
  - ◇ soit l'incertitude absolue $\Delta A$ ;
  - ◇ soit l'incertitude relative $\Delta A/A$.

  Expression de la différentielle de $f$ :

$$df = \frac{\partial f}{\partial x}dx + \frac{\partial f}{\partial y}dy + \frac{\partial f}{\partial z}dz \ .$$

  On note $\Delta x$, $\Delta y$ et $\Delta z$, les incertitudes absolues sur les mesures primaires. La quantité

$$\Delta A = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right| \Delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right| \Delta y + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right| \Delta z$$

  donne une estimation de l'incertitude de mesure sur la grandeur $A$.
- Règles de calcul classiques :

$$A = x + y + z \quad \Longrightarrow \quad \Delta A = \Delta x + \Delta y + \Delta z \ ;$$

$$A = x^m y^n \quad \Longrightarrow \quad \frac{\Delta A}{|A|} = |m|\frac{\Delta x}{|x|} + |n|\frac{\Delta y}{|y|} \ .$$

#### b) Incertitude liée à un appareil de mesure

Afin d'évaluer l'incertitude liée à un appareil de mesure, on peut utiliser les indications du constructeurs (notice). Cette procédure demeure valable si l'appareil est régulièrement ré-étalonné.

- Pour un appareil à aiguille, il est préférable de l'utiliser, si possible, pas trop loin de la pleine échelle afin d'obtenir une incertitude relative faible. Un appareil à aiguille de classe $p$ signifie qu'il introduit une incertitude relative de $p$ % sur une mesure égale au calibre. Exemple : un appareil de classe 2 comportant 150 divisions introduira une incertitude absolue de $\frac{2}{100} \cdot 150$ soit 3 divisions et ceci quelle que soit l'amplitude de la déviation.
- Pour les appareils numériques, l'incertitude absolue comprend souvent un pourcentage de la valeur mesurée plus un terme constant. Par exemple, la notice d'un voltmètre donne comme information sur l'incertitude : 0,5% +1 digit (c'est-à-dire 1 unité sur le dernier chiffre). Mesurons une même tension $U$ en utilisant deux calibres différents.
  - ◇ Affichage du voltmètre sur le calibre 200 mV : `150,0`. L'incertitude de mesure vaut alors :

$$\Delta U = \frac{0,5}{100} \cdot 150,0 + 0,1 \quad \text{soit} \quad \Delta U = 0,85 \text{ mV} \ ;$$

Affichage du voltmètre sur le calibre 20V : 00.15. L'incertitude de mesure vaut alors :

$$\Delta U = \frac{0,5}{100} \cdot 0,15 + 0,01 = 1,075.10^{-2} \text{ V} \quad \text{soit} \quad \Delta U = 10,75 \text{ mV}$$

On pourra retenir qu'il faut utiliser le plus petit calibre possible (ici 200mV) pour bénéficier du maximum de précision lors de la mesure.