



---

# Métrologie. Statistiques. Relations Internationales

---



Lucyna Firlej

Pl. E.Bataillon, Bat.11, cc.026  
34095 Montpellier cedex 5 France

[lucyna.firlej@umontpellier.fr](mailto:lucyna.firlej@umontpellier.fr)

# S1. Métrologie et capteurs.

40h d'enseignement: 8 cours, 10 TD, 6 TP

## Objectifs du module (Plan Pédagogique National 2013) :

- Etre formé au mesurage, à la maîtrise de la mesure, à la détermination des incertitudes de mesure selon les normes en vigueur.
- Connaître le vocabulaire associé, les caractéristiques générales et métrologiques des capteurs.

## Compétences visées :

- Savoir déterminer une incertitude de mesure afin d'exprimer correctement un résultat de mesure.
- Exploiter la documentation technique relative à un capteur.

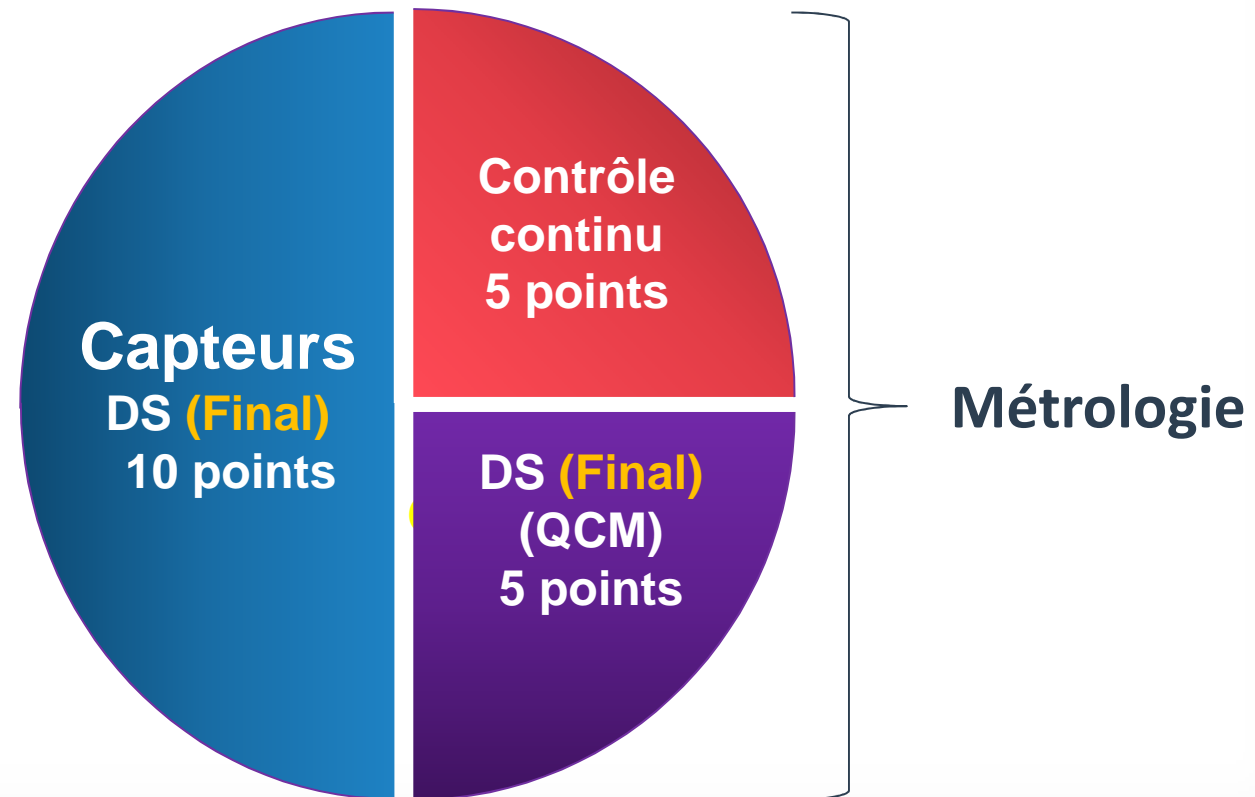
# Métrologie.

Prérequis : Notions de base en probabilités ,statistiques et dérivées.

- **Systemes d'unités.**
- **Incertitudes.**
- **Métrologie.**
- **Introduction à la statistique. Statistique descriptive.**

Cours (et notes) accessibles à : <http://www.coulomb.univ-montp2.fr/~firlej/>

# Contrôle continu des connaissances.

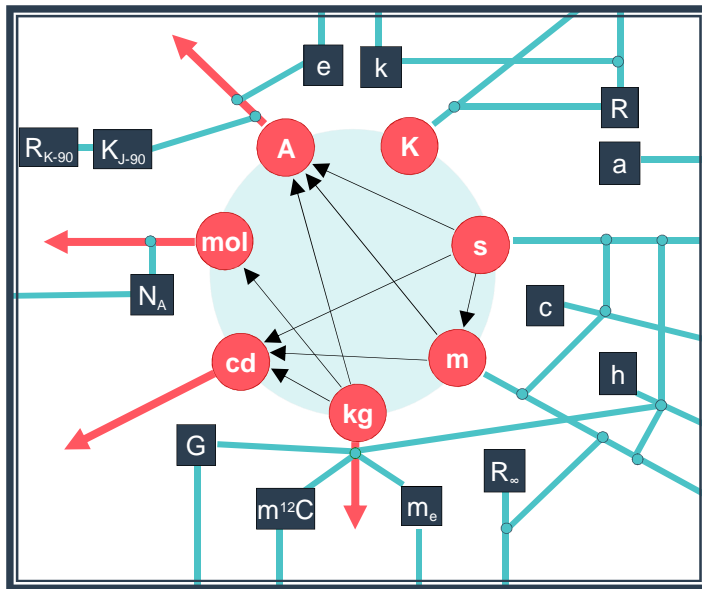


---

# Cours no.1.

## Grandeurs Physiques. Systèmes d'unités.

---



L'OBJET de la SCIENCE:

**expliquer** et **quantifier**  
les phénomènes observables.



# Grandeur physique

**attribut** d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance qui est susceptible d'être:


1. **distingué qualitativement**
2. **déterminé quantitativement.**



(chaque **mesurable** ou **repérable** caractéristique ou propriété d'un phénomène ou un corps)



# Grandeurs physiques:



grandeurs de  
base

## grandeurs physiques indépendantes:

- la longueur
- la masse
- le temps
- l'intensité du courant électrique
- la température thermodynamique
- la quantité de matière
- l'intensité lumineuse
- l'angle plan
- l'angle solide



grandeurs  
dérivées

## Exemples:

- l'énergie,
- la puissance,
- le volume,
- la fréquence
- .....



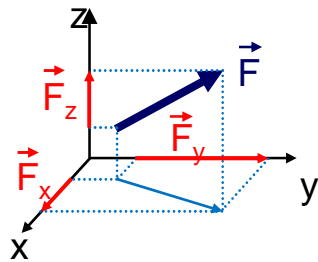


# Grandeurs physiques:

## scalaires

- pleinement caractérisées par un nombre.
- parler d'une grandeur scalaire dans une direction n'a pas de sens. (p.ex. la température d'un corps).

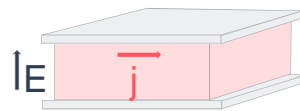
## vectérielles



- définies par rapport à une direction (p.ex. les forces).
- représentées par des flèches de longueur précise pointant dans une direction donnée.
- pour les définir, nous devons donner et leur valeur, et leurs direction dans l'espace:  $\vec{F} = [F_x, F_y, F_z]$

## tensorielles

- caractérisent les propriétés des milieux anisotropes (p.ex. cristaux).



$$\vec{j} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \vec{E}$$

# Grandeurs physiques:



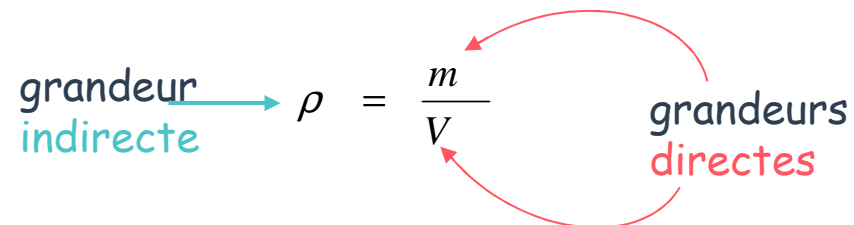
– accessibles en mesurage direct



– calculées à partir des lois physiques.

## EXEMPLE:

grandeur indirecte  $\rho = \frac{m}{V}$  grandeurs directes





# Mesure physique:

une  
comparaison

d'une grandeur physique choisie (expérimentale ou théorique) avec une grandeur de même type ('de référence'), choisie comme **un étalon**.



c'est:

mesure matérialisée, appareil de mesure, matériau de référence ou système de mesure

sert à:

**définir, réaliser, conserver** ou **reproduire** une unité, ou une ou plusieurs valeurs d'une grandeur physique **pour servir de référence**.

doit être:

précis, exact, reproductible et universel.

un ensemble  
d'actions

qui mènent à déterminer la valeur d'une grandeur physique.



# Mesure ou repérage?

grandeur mesurable

on peut la quantifier en la comparant à la grandeur ( $G_0$ ) de même espèce pris comme unité:

$$g = \frac{(G)}{(G_0)}$$

Grandeurs mesurables sont additives et commutatives

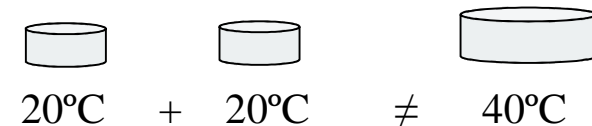
objet  $O1$  → valeur  $G1$   
objet  $O2$  → valeur  $G2$   
objet  $(O1 + O2)$  → valeur  $G1 + G2$



grandeur repérable

l'échelle numérique associée pour la caractériser dépend arbitrairement du choix d'une origine.

Grandeurs repérables ne sont pas additives



## EXEMPLES:

- la position d'un point dans l'espace (? Choix de l'origine d'un système d'axes)
- la position d'un évènement dans le temps (? Choix du calendrier)
- l'énergie totale d'un système (à une constante additive près)
- la température (choix du point fixe)



# Unité de mesure.

conséquence de la méthode de la mesure appliquée



historiquement –  
une multitude des unités utilisées  
pour quantifier la même grandeur,  
apparaissant en fonction d'évolution technologique  
et la précision des expériences les plus récentes

## EXEMPLE: définition du mètre

1793 – un dix-millionième d'un quart de méridien terrestre;

1889 – la longueur de la règle en alliage iridium-platine  
déposée au Bureau International des Poids et Mesures à Sevrés;

1960 – 1 650 763.73 de longueur d'onde de krypton  
correspondant au passage ( dans le vide)  $2p_{10} \rightarrow 5d_5$

1983 - la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière  
pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.



# Besoin d'unification.

Aujourd'hui on utilise toujours (en Europe et Amérique uniquement) :

## 18 unités de longueur

Angstroms =  $10^{-10}$  m ,  
mil = 0.00003 m  
inch = 0.0254 m  
hand = 0.1016 m  
feet = 0.3048 m  
link = 0.20117 m  
span = 0.2286 m  
cubit = 0.4318 m  
vara (TX) = 0.84667 m  
yard = 0.9144 m  
rod = 5.0292 m  
furlong = 201.168 m  
cable = 219.456 m  
mile = 1609.344 m  
nautical mile = 1852 m  
league = 4828.042 m  
naut league = 5556 m

## 15 unités de masse

grain = 0.00006 kg  
carat = 0.0002 kg  
scruple = 0.0013 kg  
pennyweight = 0.00156 kg  
dram = 0.00389 kg  
ounce = 0.0311 kg  
poundal = 0.01409 kg  
pound = 0.37324 kg  
stone = 6.35029 kg  
quarter = 11.33981 kg  
slug = 14.60567 kg  
short tone = 907.18494 kg  
tone = 1000 kg  
100 weight = 45.35924 kg

## 10 unités d'énergie

erg =  $10^{-19}$  J  
kcal = 4183.98 J  
foot-poundal = 0.04214 J  
foot-lbs = 1.35582 J  
kG = 9.80665 J  
kilowatt-hour =  $36 \cdot 10^6$  J  
horsepower-hour = 2 686.09 J  
tons of TNT =  $4180 \cdot 10^6$  J



# Un système d'unités.

**DEFINITION:** Un système d'unités de mesure est défini par un **choix conventionnel** de **grandeurs de base** auxquelles sont associées **des 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 de proportionnalité sont égaux à 1**.

## EXEMPLE:

- **mètre par seconde:** conduit à la relation
$$v = l / t$$
où le facteur de proportionnalité est 1.
- **kilomètre par heure:** fait intervenir un facteur de conversion 3,6 car  $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$  et conduit donc à une perte de cohérence du système d'unités.



# Systeme International d'unités (SI).

11-ième Conférence Internationale des Poids et Mesures (1960)

## UNITES de BASE

● mètre	(longueur)	m	L
● kilogramme	(masse)	kg	M
● seconde	(temps)	s	T
● ampère	(intensité du courant électrique)	A	I
● kelvin	(température thermodynamique)	K	$\theta$
● mole	(quantité de matière)	mol	N
● candela	(intensité de la lumière)	cd	J

## UNITES SUPPLEMENTAIRES

● radian	(angle plan)	rad
● stéradian	(angle stérique)	sr

## UNITES DERIVEES

déterminées en utilisant les lois physiques  
liant les grandeurs physiques entre elles





## Dix-neuf unités dérivées ont reçu des noms et des symboles spéciaux :

### Grandeurs dérivée

- Fréquence
- Force – Poids
- Pression – Contrainte
- Travail – Energie-Quantité de chaleur
- Puissance
- Quantité d'électricité (charge électrique)
- Différence de potentiel électrique
- Capacité électrique
- Résistance électrique (Réactance, Impédance)
- Conductance électrique
- Flux d'induction magnétique
- Induction magnétique
- Induction électrique
- Température Celsius
- Flux lumineux
- Eclairement lumineux
- Activité radioactive
- Dose absorbée
- Equivalent de dose

### nom      symbole      dimension

hertz	Hz	$T^{-1}$
newton	N	$LMT^{-2}$
pascal	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$
joule	J	$L^2MT^{-2}$
watt	W	$L^2MT^{-3}$
coulomb	C	TI
volt	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$
farad	Fa	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$
ohm	$\Omega$	$L^2MT^{-3}I^{-2}$
siemens	S	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$
weber	Wb	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
tesla	T	$MT^{-2}I^{-1}$
henry	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$
degre C	$^{\circ}C$	$\Theta$
lumen	lm	JW
lux	lx	$L^{-2}JW$
becquerel	Bq	$T^{-1}$
gray	Gy	$L^2T^{-2}$
sievert	Sv	$L^2T^{-2}$



# Unités hors SI.

Certaines unités, en dehors du SI, jouent un rôle important dans certains domaines spécialisés.

Elles sont reconnues comme pouvant être utilisées **conjointement** avec les unités S.I.



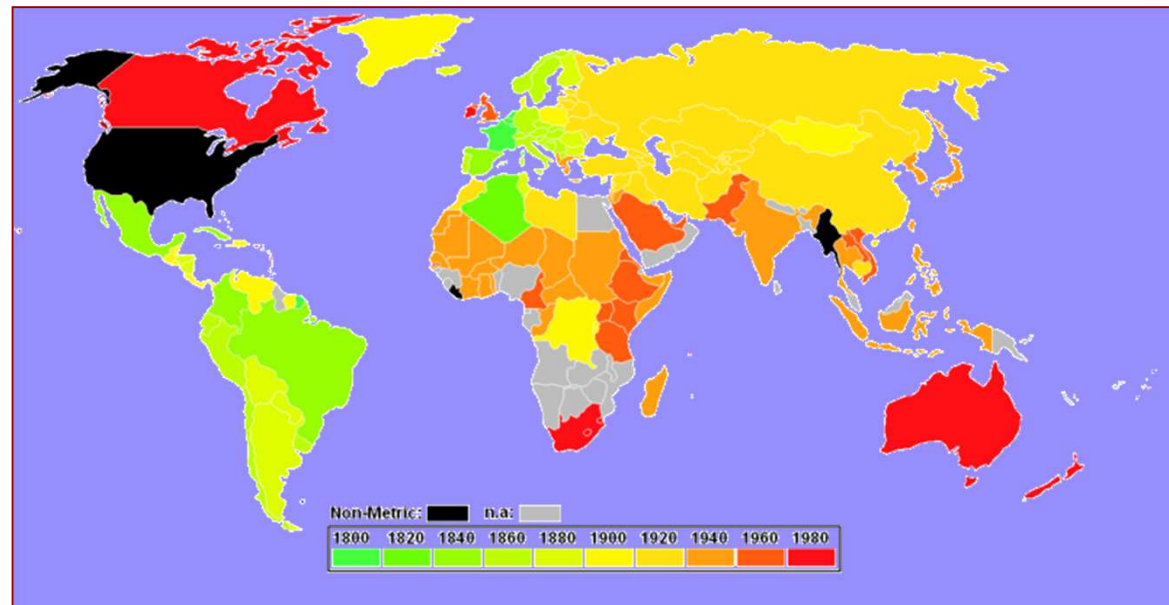
Noms	Symboles	Valeurs en unités S.I.
<b>minute</b>	<b>min</b>	60 s
<b>heure</b>	<b>h</b>	3600 s
<b>jour</b>	<b>d, j</b>	86 400 s
<b>tour</b>	<b>tr</b>	$2\pi$ rad
<b>grade, gon</b>	<b>gr, gon</b>	$(\pi/200)$ rad
<b>degré</b>	<b>°</b>	$(\pi /180)$ rad
<b>minute d'angle</b>	<b>'</b>	$(\pi /10\ 800)$ rad
<b>seconde d'angle</b>	<b>"</b>	$(\pi /648\ 000)$ rad
<b>litre</b>	<b>l, L</b>	$10^{-3}$ m <sup>3</sup>
<b>tonne</b>	<b>t</b>	$10^3$ kg
<b>électronvolt</b>	<b>eV</b>	$1,602\ 177\ 33 \cdot 10^{-19}$ J
<b>unité de masse atomique</b>	<b>u</b>	$1,660\ 540\ 2 \cdot 10^{-27}$ kg
<b>unité astronomique</b>	<b>-</b>	$149\ 600 \cdot 10^6$ m
<b>parsec</b>	<b>pc</b>	$30\ 857 \cdot 10^{12}$ m



# SI et le monde.

Trois pays n'ont toujours pas reconnus légalement le SI sur leur territoire:

- **les États-Unis**
- le Liberia
- la Birmanie.



# Préfixes (multiples) SI.

Les unités sont parfois trop grandes ou trop petites pour un usage courant. Afin d'éviter les valeurs numériques trop élevées ou trop faibles on utilise **20 multiples et sous-multiples** des unités SI:

$10^{24}$	-	yotta	-	Y	$10^{-1}$	-	deci	-	d
$10^{21}$	-	zeta	-	Z	$10^{-2}$	-	centi	-	c
$10^{18}$	-	exa	-	E	$10^{-3}$	-	mili	-	m
$10^{15}$	-	peta	-	P	$10^{-6}$	-	micro	-	$\mu$
$10^{12}$	-	tera	-	T	$10^{-9}$	-	nano	-	n
$10^9$	-	giga	-	G	$10^{-12}$	-	pico	-	p
$10^6$	-	méga	-	M	$10^{-15}$	-	femto	-	f
$10^3$	-	kilo	-	k	$10^{-18}$	-	atto	-	a
$10^2$	-	hecto	-	h	$10^{-21}$	-	zepto	-	z
$10^1$	-	deca	-	da	$10^{-24}$	-	yocto	-	y

$10^0 = 1$  (unité)

Les préfixes qui ne correspondent pas à des multiples de  $10^3$  sont à éviter.



# Conventions d'écriture des préfixes.

- Les préfixes des multiples et sous-multiples décimaux sont choisis pour présenter les résultats numériques par des **nombre de trois chiffres maximum**.

**EXEMPLE :**  $0,000\ 02\ \text{A} = 20\ \mu\text{A}$

$0,005\ \text{s} = 5\ \text{ms}$

$1500\ \text{m} = 1,5\ \text{km}$

- Un multiple ou sous-multiple d'une unité se forme en associant au nom de l'unité le préfixe en toute lettre

**EXEMPLES:** picofarad, millimètre, mégawatt, térahertz.

- L'association de deux préfixes par unité n'est pas autorisé.

**EXEMPLE :** non pas “micromillimètre”, mais un nanomètre.

- Un préfixe doit être associé à un nom d'unité.

**EXEMPLE :** non pas “un kilo”, mais un kilogramme



# Conventions d'écriture des préfixes.

- Les symboles des préfixes sont accolés aux symboles des unités.  
**EXEMPLE:** 1 gigaelectronvolt = 1 GeV =  $10^9$  eV
- Le symbole d'un préfixe, combiné avec le symbole d'une unité S.I., constitue un nouveau symbole qui peut être élevée à une puissance.  
**EXEMPLE:**  $1\text{mm}^3 = (10^{-3}\text{m})^3 = 10^{-9}\text{m}^3$
- Les préfixes peuvent s'appliquer à des unités hors SI (p.ex. l'unité monétaire).
- Les préfixes ne sont pas associés aux :
  - unités Hors SI** : jours (j ou d), heure (h), minute (min), tour (tr), degré ( $^\circ$ ), minute d'angle ( $'$ ), seconde d'angle ( $''$ ), quintal (q).
  - unités SI** : le "kilogramme" qui comprend déjà le préfixe kilo.  
Dans ce cas c'est au gramme que s'applique les préfixes.



# SI et le progrès de la science.

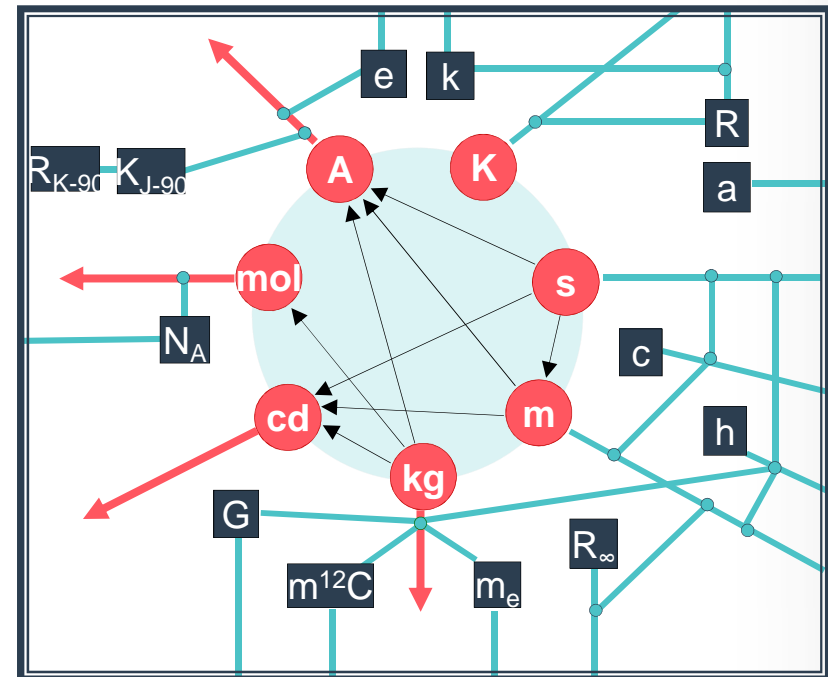
Le SI n'est pas statique ;  
il évolue en fonction du progrès de la science  
pour tenir compte des besoins des utilisateurs .

Actuellement le SI est constitué de sept unités de base.

Toutefois, certaines des grandeurs  
correspondantes à ces unités  
ne sont pas totalement indépendantes.

L'évolution de la physique moderne,  
les réalisations des nouvelles expériences  
et l'expertise technique acquise  
devraient conduire dans les prochaines années  
à une **transformation du SI**.

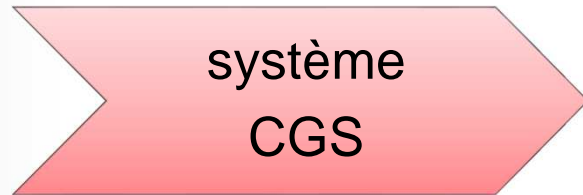
L'orientation actuelle serait de relier  
directement les unités actuelles du SI  
à certaines constantes fondamentales.



La longueur est reliée au temps par une constante  
fondamentale, la célérité de la lumière  $c$ .

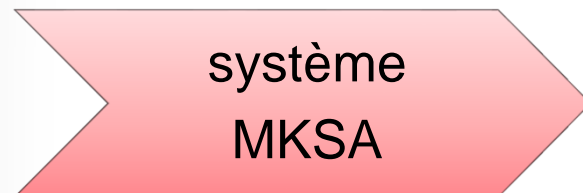


# Autres systèmes d'unités.



## grandeurs de base

- la longueur - **C**entimetre
- la masse - **G**ramme
- le temps - **S**econde



## grandeurs de base

- la longueur - **M**etre
- la masse - **K**ilogramme
- le temps - **S**econde
- l'intensité - **A**mpere  
electrique

certaines des unités de ces systèmes ne sont pas acceptées à être utilisées avec des unités SI !!!! (p.ex. erg, dyne...)





# Equations aux dimensions.

Elles permettent:

- de **déterminer** la dimension et l'unité d'une grandeur dérivée en fonction des dimensions et unités des grandeurs fondamentales
- d'**effectuer** éventuellement des changements d'unités.
- de **vérifier l'homogénéité** des formules littérales.  
Les grandeurs **A** et **B** sont dites **homogènes** et de même dimension, si  **$A = k \cdot B$**  avec **k** réel.
- de **prévoir** par une analyse dimensionnelle une formule traduisant une loi physique.

L'équation aux dimensions ne nous renseigne pas sur la nature exacte d'une grandeur.



# TD 1. Equations aux dimensions.

1. Trouver l'équation aux dimensions de  $\epsilon_0$ , constante universelle de la loi de Coulomb:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$

2. Dans quelles unités est exprimée la quantité  $X$ , donnée par la formule ci-contre, si  $e$  = charge élémentaire,  $m$  = masse d'un électron,  $t$  = temps,  $E$  = intensité de champs électrique  $k$  = constante de frottement, donnée par la formule  $|F| = k|v|$  ? 
$$X = \frac{eE}{k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \right]$$

3. Quelle est l'équation aux dimensions de la quantité  $X$  donnée par la formule ci-contre, où  $i$  = unité imaginaire,  $R$  = résistance,  $C$  = capacité,  $\omega$  = pulsation d'un courant alternatif ? 
$$X = \frac{R(1 - i\omega RC)}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

4. On a trouvé, pour la fréquence de vibration d'une corde, la formule donnée ci-contre où  $l$  = longueur de la corde,  $M$  = sa masse,  $F$  = sa tension. Cette formule peut-elle être exacte? 
$$f = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{Fl}{M}}$$

5. Sachant que la vitesse acquise par un corps de masse  $m$  tombant dans le vide d'une hauteur  $h$  est de forme  $v = m^\alpha h^\beta g^\gamma$ , déterminer  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

6. La chute libre d'un corps lâché au temps  $t = 0$  en  $s = 0$  s'écrit:  $s(t) = gt^2/2$ , où  $s$  désigne l'abscisse verticale. Quelle unité de temps faudrait-il choisir pour que la loi  $s(t)$  s'exprime avec une constante dimensionnelle  $1/2g = 1$ , et  $s$  restant toujours exprimé en mètres ?



# Annexe 1. Etalons en vigueur.

Les **unités fondamentales** doivent être matérialisées par des **étalons fondamentaux**.

Le progrès de la technique provoque l'évolution des critères de choix des étalons et amène à changer les étalons de mesure.

La réalisation et l'amélioration des étalons de mesure, en France, sont à la charge de laboratoires désignés par le Bureau National de Métrologie.

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

Parmi toutes les grandeurs physiques, la **plus grande précision ( $10^{-14}$ )** est obtenue sur l'étalon du temps et de la fréquence par l'horloge atomique à Cs.

\* \* \* \* \*

➤ **Kilogramme (kg) – 1961:**

la masse de  $50\,259.36217 \times 10^{21}$  atomes de  $^{12}\text{C}$  dans des conditions (T, p...) précises.

➤ **Mètre (m) - 1983 :**

le trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  s.



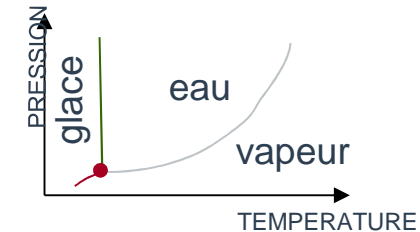
# Annexe 1. Etalons en vigueur.

## ➤ seconde (s) - 1967 :

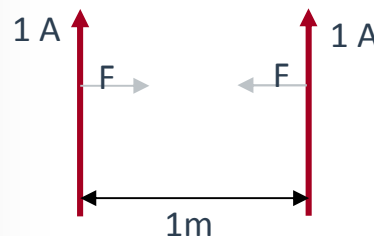
la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

## ➤ Kelvin (K) - 1967 :

la fraction  $1/273,16$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau.



## ➤ Ampère (A) - 1948 : pas d'étalon 'objet', définition par 'expérience idéale':



L'ampère est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, infinis, de section négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre eux une force égale à  $2 \cdot 10^{-7}$  N par mètre de longueur.

## ➤ mole (mol) - 1983 :

la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone  $^{12}\text{C}$

## ➤ candela (cd) - 1979 :

l'intensité lumineuse d'une source qui émet dans une direction donnée un rayonnement monochromatique de fréquence 540 1012 hertz et d'intensité  $1/683$  watt par stéradian.



# Annexe 2. Convention d'écriture des noms d'unités.

- Les noms d'unités sont des noms communs écrits en lettres minuscules.

**EXEMPLES:** un mètre, un kelvin, un newton, des pascals, des siemens, des hertz ...

**Exception :** Le nom propre prend une majuscule quand il est associé à l'unité degré :  
degré Celsius, degré Fahrenheit, degré Rankine, degré Réaumur.

- Ils prennent un "s" au pluriel sauf si les noms sont déjà terminés par un s, x ou z.

- L'unité, produit de deux unités, est formée :

→ soit en séparant leurs noms par un trait d'union :

→ soit en accolant les noms d'unités

**EXEMPLES:** ohm - mètre ( unité de résistivité électrique)  
wattheure (unité d'énergie électrique)

- L'unité, quotient de deux unités, se forme en séparant le nom de l'unité dividende du nom de l'unité diviseur par la préposition "par":

**EXEMPLES:** mètre(s) par seconde (unité de vitesse)

- Ne pas ajouter un qualificatif au nom d'unité:

**EXEMPLE:** non pas "volts efficaces" mais "tension efficace exprimée en volts"



# Annexe 3. Convention d'écriture des symboles d'unités.

- Les symboles d'unités sont exprimés généralement en minuscules sauf si l'unité dérive d'un nom propre.

**EXEMPLES:** m, kg, s, mol, cd, A (Ampère), K (kelvin), J (Joule)

**Exception :**  $\Omega$ , lettre majuscule grecque : symbole de l'Ohm.

- Les symboles d'unités sont invariables au pluriel et se placent après la valeur numérique complète séparés de celle-ci par un espace

**EXEMPLE:** non pas 10,54m ou 10m54, mais 10,54 m

- Dans une division non décimale avec sous-multiples, le symbole (ou le nom) s'intercale entre les valeurs numériques de ces sous-multiples, sans virgule :

**EXEMPLE:** 10 degrés 15 minutes 20 secondes ou  $15^{\circ} 25' 20''$

- Ne pas utiliser un symbole d'unité, après un nombre écrit en lettres ou dans un texte.

**EXEMPLES:** écrire trois mètres ou 3 mètres ou 3 m et non trois m.

La durée exprimée en secondes et non "la durée exprimée en s".

- Ne pas combiner les symboles et noms d'unités :

**EXEMPLE:** écrire m/s ou mètre par seconde  
et non m/seconde ou mètre/seconde.



