

# Les unités de mesure en physique

Historique

Équations aux dimensions

Le système international

Définitions des unités fondamentales

Grandeurs supplémentaires

Unités dérivées

Espace

Masse

Temps

Quantité de matière

Mécanique

Électricité

Chaleur

Photométrie

Rayonnements ionisants

Conventions d'écriture

Constantes de la physique

## Un peu d'histoire

Quand j'ai commencé l'étude de la physique le système légal d'unités en France était le système MTS (mètre, tonne et seconde). Les mécaniciens et les ingénieurs utilisaient le système MKpS (mètre, kilogramme-poids et seconde) dans lequel la deuxième unité fondamentale est la force qui correspond au poids d'une masse de un kilogramme en un lieu où l'accélération de la pesanteur vaut  $981 \text{ cm/s}^2$ . Selon leur humeur les gens exprimaient les forces en kilogrammes-poids(kgp), en kilogrammes-force (kgf) voire en kilogrammes (kg). Dans mon livre de physique de seconde acheté en 1957 on peut lire « la force d'un cheval est en moyenne 70 kilogrammes » ! Les physiciens qui eux faisaient la distinction entre la masse et la force utilisaient le système CGS (centimètre, gramme et seconde) créé vers 1860 et dont l'emploi est général vers 1880. Mais pour des raisons diverses (conservatisme, désir de laisser à la mécanique son rôle de reine de la physique ...) les physiciens refusaient l'idée de considérer une quatrième grandeur fondamentale pour exprimer les grandeurs électriques alors que l'adoption de la température pour l'étude de la thermodynamique n'a posé aucun problème. Pour l'étude de

l'électrostatique on utilisait le système UES-CGS (Unités électrostatiques CGS). Dans ce système on écrit que la loi de Coulomb dans le vide est  $F = Q_1.Q_2 / r^2$ . On considère donc que la permittivité du vide ( $\epsilon_0$ ) est égale à l'unité.

Par contre pour l'étude du magnétisme on utilisait le système UEM-CGS (Unités électromagnétiques CGS). Dans ce système on considère que la perméabilité du vide ( $\mu_0$ ) est égale à l'unité. Dans les deux systèmes certaines unités sont très grandes et d'autres très petites et il apparaît de nombreux coefficients numériques dans les formules.

Il fallait connaître les unités de ces divers systèmes et faire les conversions entre les unités.

Pourtant dès 1905 le physicien italien Giorgi avait proposé d'utiliser le courant électrique comme quatrième grandeur fondamentale et pour les grandeurs mécaniques d'employer le mètre, le kilogramme et la seconde unités adaptées à la vie courante et aux travaux des physiciens. Il donnait ainsi les bases du système MKSA. Petit à petit ce système a fini par s'imposer avec toutefois le problème de la rationalisation. Dans de nombreuses formules de l'électricité apparaît un facteur  $4\pi$  qui est l'angle solide sous lequel d'un point on voit l'espace. Fallait-il faire apparaître ce terme dans les formules ou l'inclure dans les constantes ?

Fallait-il prendre  $\epsilon_0 = 10^{-7}$  ou  $\epsilon_0 = 4\pi.10^{-7}$  ?

C'est finalement le système rationalisé qui s'est imposé pour devenir le système international ou SI qui est devenu le système légal en France seulement en 1961.

## Équations aux dimensions

Dans une relation entre grandeurs, on remplace chaque terme par la grandeur fondamentale correspondante L pour une longueur, M pour une masse, T pour un temps, I pour une intensité électrique...

On obtient ainsi l'équation aux dimensions.

Cette équation permet :

- De déterminer l'unité composée d'une grandeur en fonction des grandeurs fondamentales.
- De tester si une formule est homogène.
- De faire des conversions d'unités.

Exemple d'unité composée :

De la formule :  $e = \frac{1}{2}.g.t^2$ , on tire la dimension de  $g = LT^{-2} \Leftrightarrow$  accélération en  $m.s^{-2}$ .

Homogénéité :

Des formules :  $\frac{1}{2}.m.v^2 = m.g.h$ , on tire  $M.(L.T^{-1})^2 = M.L.T^{-2}.L$

La dimension d'une énergie est donc :  $M.L^2.T^{-2}$

Conversion d'unité :

Pression  $p = F/S = M.L.T^{-2}.L^{-2} = M.L^{-1}.T^{-2}$ .

En CGS l'unité est la barye (dyne/cm<sup>2</sup>)

En SI l'unité est le pascal (newton/m<sup>2</sup>)

Rapport des unités de masse :  $M_{SI}/M_{CGS} = 10^3$

Rapport des unités de longueur  $L_{SI}/L_{CGS} = 10^2$

Finalement : 1 pascal = 10 baryes

# Le système international d'unités

Pour créer un système d'unités, il faut définir des unités de base, leurs valeurs et définir les unités dérivées. Pour les unités mécaniques le choix le plus courant est de prendre la longueur, la masse et le temps mais d'autres options sont possibles comme longueur, force et temps ou masse, vitesse et temps...

Le système international (SI) a été mis en place par la 11<sup>e</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) qui fixa en 1960 des règles pour les préfixes, les unités dérivées et d'autres indications. Le SI est fondé sur un choix de sept **unités de base** bien définies et considérées par convention comme indépendantes du point de vue dimensionnel : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. Les **unités dérivées** sont formées en combinant les unités de base d'après les relations algébriques qui lient les grandeurs correspondantes. Les noms et les symboles de certaines de ces unités peuvent être remplacés par des noms et des symboles spéciaux qui peuvent être utilisés pour exprimer les noms et symboles d'autres unités dérivées.

## Tableau des unités fondamentales du SI

Grandeur	Nom	Symbole	Dimension
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps	seconde	s	T
Intensité du courant électrique	ampère	A	I
Température thermodynamique	kelvin	K	$\Theta$
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J

## Définitions des unités fondamentale du SI

Ces définitions ont été copiées sur le site du Bureau international des poids et mesure :

[www.bipm.org/fr/si](http://www.bipm.org/fr/si)

### Définition du mètre adoptée en 1983 :

*Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.*

Il en résulte que la vitesse de la lumière dans le vide est égale à 299 792 458 mètres par seconde exactement,  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s.

## Définition du kilogramme :

*Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme ;*

Le terme *poids* désigne une grandeur de la même nature qu'une *force* ; le poids d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération de la pesanteur ; en particulier, le poids normal d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération normale de la pesanteur ; le nombre adopté dans le Service international des Poids et Mesures pour la valeur de l'accélération normale de la pesanteur est  $980,665 \text{ cm/s}^2$ , nombre sanctionné déjà par quelques législations.

Le kilogramme est actuellement défini comme la masse d'un cylindre en platine iridié (90 % de platine et 10% d'iridium) de 39 mm de diamètre et 39 mm de haut déclaré unité SI de masse depuis 1889 par le Bureau international des poids et mesures (BIPM).

Cette unité de mesure est la dernière du SI à être définie au moyen d'un étalon matériel fabriqué par l'homme. Celui-ci est conservé sous trois cloches de verre scellées dont il n'est extrait que pour réaliser des étalonnages (opération qui n'a eu lieu que trois fois depuis sa création).

## Définition de la seconde adoptée en 1967

*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.*

Il en résulte que la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium est égale à 9 192 631 770 hertz exactement,  $\nu(\text{hfs Cs}) = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$ .

Lors de sa session de 1997, le Comité international a confirmé que :

Cette définition se réfère à un atome de césium au repos, à une température de 0 K.

## Définition de l'ampère adoptée en 1948

*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 1 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.*

Il en résulte que la constante magnétique, aussi connue sous le nom de perméabilité du vide, est égale à  $4\pi \cdot 10^{-7}$  henrys par mètre exactement,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

## Définition du kelvin adoptée en 1967

*Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.*

Il en résulte que la température thermodynamique du point triple de l'eau est égale à 273,16 kelvins exactement,  $T_{\text{tpw}} = 273,16 \text{ K}$ .

### Définition de la mole

*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 ; son symbole est « mol ».*

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 spécifiés de telles particules. Dans cette définition, il est entendu que l'on se réfère à des atomes de carbone 12 non liés, au repos et dans leur état fondamental.

Il en résulte que la masse molaire du carbone 12 est égale à 0,012 kilogramme par mole exactement,  $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$ .

### Définition de la candela adoptée en 1979

*La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.*

Il en résulte que l'efficacité lumineuse spectrale d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz est égale à 683 lumens par watt soit  $K = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr/W}$ .

## Grandeurs supplémentaires du système international

Deux grandeurs supplémentaires ont été introduites pour assurer la cohérence du système

Grandeur	Nom	Symbole	Dimension
Angle plan	radian	rad	
Angle solide	stéradian	sr	( $\Omega$ )

## Grandeurs dérivées du système international

### Espace

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Longueur	L	mètre	m	mille marin = 1852 m
Nombre d'onde	L <sup>-1</sup>		m <sup>-1</sup>	
Aire	L <sup>2</sup>	mètre carré	m <sup>2</sup>	are (a) = 100 m <sup>2</sup> hectare (ha) = 10 000 m <sup>2</sup>
Volume	L <sup>3</sup>	mètre cube	m <sup>3</sup>	litre (l) = 1 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
Angle plan		radian	rad	tour (tr) = 2π rad degré (°) = π/180 rad minute (') = π/10 800 rad seconde (") = π/648 000 rad grade = π/200 rad

### Masse

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Masse	M	kilogramme	kg	gramme (g) = 10 <sup>-3</sup> kg tonne (t) = 10 <sup>3</sup> kg
Masse volumique	M.L <sup>-3</sup>	kilogramme par mètre cube	kg.m <sup>-3</sup>	

### Temps

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Temps	T	seconde	s	minute (min) = 60 s heure (h) = 3600 s jour (d) = 86400 s
Fréquence	T <sup>-1</sup>	hertz	Hz	

### Quantité de matière

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Quantité de matière	N	mole	mol	

## Mécanique

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Vitesse	$LT^{-1}$	mètre par seconde	m/s	kilomètre par heure (km/h) nœud (mille par heure)
Accélération	$LT^{-2}$	mètre par seconde carrée	$m/s^2$ $ms^{-2}$	
Force	$MLT^{-2}$	newton	N	
Moment de force	$ML^2T^{-2}$	newton-mètre	N.m	
Tension superficielle	$MT^{-2}$	newton par mètre	N/m	
Travail Energie	$ML^2T^{-2}$	joule	J	wattheure (Wh) = $3,610^3$ J kilowattheure (kWh) = $3,610^6$ J
Puissance	$ML^2T^{-3}$	watt	W	
Pression	$ML^{-1}T^{-2}$	pascal	Pa	bar (bar) = $10^5$ Pa
Moment d'inertie	$ML^2$	kilogramme-mètre carré	$kg.m^2$	
Quantité de mouvement	$MLT^{-1}$	newton-seconde	N.s	
Viscosité dynamique	$ML^{-1}T^{-1}$	pascal-seconde	Pa.s	
Viscosité cinématique	$L^2T^{-1}$	mètre carré par seconde	$m^2/s$	

### Les unités de pression :

Le **pascal** est l'une des rares unités du SI qui n'est pas adaptée à la vie courante. De ce fait on utilise toujours des unités hors système.

Le **bar** ( 1 bar =  $10^5$  pascals) est très utilisé dans l'industrie.

L'hectopascal est utilisé en météorologie.

Il se trouve que le bar correspond pratiquement à la valeur de l'atmosphère normale :

$$1 \text{ atm} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$$

L'hectopascal est utilisé en météorologie.

La pression atmosphérique a longtemps été mesurée avec des baromètres à mercure. On utilise toujours le **torr** (mm de Hg à 0°C) qui correspond à 133,3 pascals et le cm de mercure (1333 Pa).

Dans certaines industries on utilise aussi le psi (pound per square inch) 1 psi =  $6,89476 \cdot 10^3$  Pa

## Électricité

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Courant électrique	I	ampère	A	
Force électromotrice, différence de potentiel	$ML^2T^{-3}I^{-1}$	volt	V	
Quantité d'électricité	TI	coulomb	C	ampère-heure = 3600 C
Résistance, Impédance	$ML^2T^{-3}I^{-2}$	ohm	$\Omega$	
Conductance	$M^{-1}L^{-2}T^3I^2$	siemens	S	
Capacité électrique	$M^{-1}L^{-2}T^4I^2$	farad	F	
Inductance électrique	$ML^2T^{-2}I^{-2}$	henry	H	
Induction magnétique	$MT^{-2}I^{-2}$	tesla	T	
Flux d'induction magnétique	$ML^2T^{-2}I^{-1}$	weber	Wb	
Intensité de champ magnétique	$L^{-1}I$	ampère par mètre	A/m	
Puissance apparente	$ML^2T^{-3}$	voltampère	VA	
Puissance réactive	$ML^2T^{-3}$	voltampère réactif	var	

## Chaleur

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Température thermodynamique	$\Theta$	kelvin	K	degré Celsius °C
Capacité thermique	$ML^2T^{-2}\Theta^{-1}$	joule/kelvin	J/K	
Conductivité thermique	$MLT^{-3}\Theta^{-1}$	watt par mètre-kelvin	W/(m.K)	
Convection thermique	$MT^{-3}\Theta^{-1}$	watt par mètre carré-kelvin	W/(m <sup>2</sup> .K)	
Intensité acoustique	$MT^{-3}$	watt par mètre carré	W/m <sup>2</sup>	



## Photométrie

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Intensité lumineuse	J	candela	cd	
Flux lumineux	$J\Omega$	lumen (cd/sr)	lm	
Eclairement lumineux	$L^{-2}J\Omega$	lux (lm/m <sup>2</sup> )	lx	
Luminance	$L^{-2}J$	candela par mètre carré	cd/m <sup>2</sup>	
Vergence	$L^{-1}$	dioptrie	$\delta$	

### Définitions :

Le **lumen** est le flux lumineux émis dans un angle solide de un stéradian par une source ponctuelle placée au centre de l'angle solide et dont l'intensité est de une candela.

Le **lux** est l'éclairement d'une surface qui reçoit un flux lumineux de un lumen par mètre carré.

## Rayonnement ionisants

Grandeur	Dimension	Nom	Symbole	Autres unités légales
Activité radioactive	$T^{-1}$	becquerel	Bq	
Dose absorbée	$L^2T^{-2}$	gray	Gy	
Équivalent de dose	$L^2T^{-2}$	sievert	Sv	
Dose d'exposition	$M^{-1}TI$	coulomb par kilogramme	C/kg	

### Définitions :

Le **becquerel** est l'activité d'une quantité de noyau radioactif dont le nombre de transitions nucléaires spontanées est égal à un par seconde.

Le **gray** est la dose absorbée par un élément de masse un kilogramme auquel les rayonnements communiquent une énergie de un joule.

## Tableau des préfixes

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

### Conventions d'écriture

#### Écriture des unités :

**Les noms d'unités sont des noms communs** : donc pas de majuscule et variation au pluriel.

Mais il faut écrire degrés Celsius car l'unité est degré

Si les noms d'unités composées sont séparés par un trait d'union, les deux noms s'accordent

Exemple : des newtons-mètres mais des voltampères.

#### Noms d'unités avec des préfixes

Le préfixe est accolé au nom de l'unité. Si le nom de l'unité commence par une voyelle, il peut y avoir élision (mégohm et pas mégaohm)

#### Écriture des symboles des unités :

Ils s'écrivent en principe en minuscule sauf s'ils dérivent d'un nom propre (Ampère, Newton )

Ils sont toujours invariables.

Quand les symboles sont préfixés, le préfixe doit être collé au symbole. Il faut écrire hPa et non pas h Pa.

Pour les quotients, on peut écrire  $m/s^2$  mais pas  $m/s/s$ . Il est préférable d'écrire  $m \cdot s^{-2}$ .

#### Écriture des valeurs numériques :

En France, le séparateur décimal est la virgule.

On peut découper les grands nombres en tranches de trois chiffres séparées par un blanc.

Le nom ou le symbole de l'unité est écrit à la fin de la valeur numérique :

Il faut écrire 12,54 W et pas 12 W 54.

Écrire un nombre de décimales compatible avec la précision de la mesure :

Pour une mesure réalisée avec une précision de  $10^{-2}$  écrire 5,23 et pas 5,2289.

# Constantes de la physique

Constante	Valeur	Unité	Précision
Avagadro L	$6,022\ 141\ 79 \cdot 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Boltzman k	$1,380\ 650\ 4 \cdot 10^{-23}$	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
$\epsilon_0$	$8,854\ 187\ 817 \cdot 10^{-12}$	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	Exact
Masse électron $m_e$	$9,109\ 382\ 15 \cdot 10^{-31}$	kg	$5 \cdot 10^{-8}$
Masse du proton	$1,672\ 621\ 637 \cdot 10^{-27}$	kg	$5 \cdot 10^{-8}$
Charge élémentaire e	$1,602\ 1764\ 87 \cdot 10^{-19}$	C	$2,5 \cdot 10^{-8}$
$\mu_0$	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$	Exact
Gravitation G	$6,674\ 28 \cdot 10^{-11}$	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Planck h	$6,626\ 068\ 96 \cdot 10^{-34}$	J.s	$5 \cdot 10^{-8}$
Rydberg R	10 973 731,568	$\text{m}^{-1}$	$6 \cdot 10^{-12}$
Vitesse de la lumière dans le vide c	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Exact
Stefan-Boltzman $\sigma$	$5,670\ 400 \cdot 10^{-8}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6}$
Constante des gaz R	8,314 472	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$

Les valeurs de ce tableau proviennent du site :  
<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

Remarque :

En prenant comme vitesse de la lumière  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s, on obtient  $\epsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^9$ .

L'erreur est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Prendre cette valeur pour  $\epsilon_0$  permet de simplifier beaucoup de calculs littéraux.