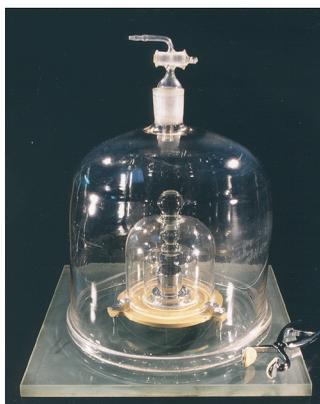


# Résumé de la Brochure sur le Système international d'unités, le **SI**

*La métrologie est la science de la mesure ; elle embrasse toutes les mesures dont le niveau d'incertitude est connu, dans tous les domaines d'activité humaine.*

Le Bureau international des poids et mesures, le BIPM, a été établi en vertu de l'article 1 de la Convention du Mètre le 20 mai 1875 ; il est chargé d'établir les fondements d'un système de mesures, unique et cohérent, pour le monde entier. Le système métrique décimal, qui date de l'époque de la Révolution française, était fondé sur le mètre et le kilogramme. Selon les termes de la Convention du Mètre signée en 1875, de nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme furent fabriqués et approuvés officiellement par la Première Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1889. Ce système a évolué au cours du temps et il comprend maintenant sept unités de base. En 1960, la 11<sup>e</sup> Conférence générale lui donna le nom de Système international d'unités, SI. Le SI n'est pas statique, mais il évolue afin de répondre aux exigences toujours accrues en matière de mesures, à tous les niveaux de précision et dans tous les domaines des sciences, de la technologie et des activités humaines dans le monde. Ce document est un résumé de la **Brochure sur le SI**, la publication officielle du BIPM concernant le SI.

Les sept **unités de base** du SI, qui figurent au tableau 1, constituent le fondement permettant de définir toutes les unités de mesure du Système international. En fonction des progrès de la science et du perfectionnement des méthodes de mesure, il est nécessaire de réviser et d'améliorer leur définition de temps à autre et d'apporter sans cesse plus de soin à leur réalisation.



*Le prototype international du kilogramme,  $\mathcal{K}$ , le seul étalon matériel encore utilisé aujourd'hui pour définir une unité de base du SI.*

Tableau 1 Les sept unités de base du SI

## Grandeur

Unité, symbole : définition de l'unité

### longueur

**mètre, m** : 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,  $c_0$ , est égale à  $299\,792\,458$  m/s exactement.*

### masse

**kilogramme, kg** : Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.  
*Il en résulte que la masse du prototype international du kilogramme,  $m(\mathcal{K})$ , est toujours égale à 1 kg exactement.*

### temps

**seconde, 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 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 133,  $\nu(\text{hfs Cs})$ , est égale à  $9\,192\,631\,770$  Hz exactement.*

### courant électrique

**ampère, A** : 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  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.  
*Il en résulte que la constante magnétique,  $\mu_0$ , aussi connue sous le nom de perméabilité du vide, est égale à  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m exactement.*

### température thermodynamique

**kelvin, K** : 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,  $T_{\text{tpw}}$ , est égale à 273,16 K exactement.*

### quantité de matière

**mole, mol** :

1. 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.
2. 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.  
*Il en résulte que la masse molaire du carbone 12,  $M(^{12}\text{C})$ , est égale à 12 g/mol exactement.*

### intensité lumineuse

**candela, cd** : 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,  $K$ , du rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz est égale à 683 lm/W exactement.*

Les sept **grandeurs de base** correspondant aux sept **unités de base** sont la longueur, la masse, le temps, le courant électrique, la température thermodynamique, la quantité de matière, et l'intensité lumineuse. Les **grandeurs de base** et les **unités de base** figurent, avec leur symbole, au tableau 2.

Tableau 2 *Grandeurs de base et unités de base du SI*

Grandeur de base	Symbole	Unité de base	Symbole
longueur	$l, h, r, x$	mètre	m
masse	$m$	kilogramme	kg
temps, durée	$t$	seconde	s
courant électrique	$I, i$	ampère	A
température thermodynamique	$T$	kelvin	K
quantité de matière	$n$	mole	mol
intensité lumineuse	$I_v$	candela	cd

Toutes les autres grandeurs sont des **grandeurs dérivées** et sont exprimées au moyen d'**unités dérivées**, définies comme étant des produits de puissances des **unités de base**. Des exemples de **grandeurs dérivées** et d'**unités dérivées** figurent au tableau 3.

Tableau 3 *Exemples de grandeurs dérivées et d'unités dérivées*

Grandeur dérivée	Symbole	Unité dérivée	Symbole
superficie	$A$	mètre carré	$m^2$
volume	$V$	mètre cube	$m^3$
vitesse	$v$	mètre par seconde	m/s
accélération	$a$	mètre par seconde carrée	$m/s^2$
nombre d'ondes	$\sigma, \tilde{\nu}$	mètre à la puissance moins un	$m^{-1}$
masse volumique	$\rho$	kilogramme par mètre cube	$kg/m^3$
masse surfacique	$\rho_A$	kilogramme par mètre carré	$kg/m^2$
volume massique	$v$	mètre cube par kilogramme	$m^3/kg$
densité de courant	$j$	ampère par mètre carré	$A/m^2$
champ magnétique	$H$	ampère par mètre	A/m
concentration	$c$	mole par mètre cube	$mol/m^3$
concentration massique	$\rho, \gamma$	kilogramme par mètre cube	$kg/m^3$
luminance lumineuse	$L_v$	candela par mètre carré	$cd/m^2$
indice de réfraction	$n$	un	1
perméabilité relative	$\mu_r$	un	1

Notons que l'indice de réfraction et la perméabilité relative sont des exemples de grandeurs sans dimension, dont l'unité SI, même si elle n'est pas mentionnée explicitement, est le nombre un.

Certaines **unités dérivées** ont reçu un **nom spécial** afin d'exprimer, sous une forme condensée, des combinaisons d'**unités de**

**base** fréquemment utilisées. Ainsi, par exemple, le joule, symbole J, est par définition égal à  $m^2 kg s^{-2}$ . Le tableau 4 donne la liste des 22 noms spéciaux d'unités dont l'usage est actuellement approuvé avec le SI.

Tableau 4 *Unités SI dérivées ayant des noms spéciaux*

Grandeur dérivée	Nom de l'unité dérivée	Symbole de l'unité	Expression utilisant d'autres unités
angle plan	radian	rad	$m/m = 1$
angle solide	stéradian	sr	$m^2/m^2 = 1$
fréquence	hertz	Hz	$s^{-1}$
force	newton	N	$m kg s^{-2}$
pression, contrainte	pascal	Pa	$N/m^2 = m^{-1} kg s^{-2}$
énergie, travail, quantité de chaleur	joule	J	$N m = m^2 kg s^{-2}$
puissance, flux énergétique	watt	W	$J/s = m^2 kg s^{-3}$
charge électrique, quantité d'électricité	coulomb	C	$s A$
différence de potentiel électrique	volt	V	$W/A = m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
capacité électrique	farad	F	$C/V = m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
résistance électrique	ohm	$\Omega$	$V/A = m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
conductance électrique	siemens	S	$A/V = m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
flux d'induction magnétique	weber	Wb	$V s = m^2 kg s^{-2} A^{-1}$
induction magnétique	tesla	T	$Wb/m^2 = kg s^{-2} A^{-1}$
inductance	henry	H	$Wb/A = m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
température Celsius	degré Celsius	$^{\circ}C$	K
flux lumineux	lumen	lm	$cd sr = cd$
éclairage lumineux	lux	lx	$lm/m^2 = m^{-2} cd$
activité d'un radionucléide	becquerel	Bq	$s^{-1}$
dose absorbée, énergie massique (communiquée), kerma	gray	Gy	$J/kg = m^2 s^{-2}$
équivalent de dose, équivalent de dose ambiant	sievert	Sv	$J/kg = m^2 s^{-2}$
activité catalytique	katal	kat	$s^{-1} mol$

Bien que le hertz et le becquerel soient égaux à la seconde à la puissance moins un, le hertz est utilisé uniquement pour des phénomènes cycliques et le becquerel pour des processus stochastiques concernant la désintégration radioactive.

L'unité de température Celsius est le degré Celsius,  $^{\circ}C$ , dont l'amplitude est égale à celle du kelvin, K, l'unité de température thermodynamique. La grandeur température Celsius,  $t$ , est liée à la température thermodynamique,  $T$ , au moyen de l'équation  $t/^{\circ}C = T/K - 273,15$ .

Le sievert est aussi utilisé pour les grandeurs équivalent de dose directionnel et équivalent de dose individuel.

Les quatre derniers noms spéciaux figurant au tableau 4 ont été adoptés pour la sûreté des mesures liées à la santé humaine.

Pour chaque grandeur il n'existe qu'une seule unité SI, qui peut être exprimée de diverses façons au moyen des noms spéciaux. Toutefois, la même unité SI peut être utilisée pour exprimer les valeurs de plusieurs grandeurs différentes (par exemple, l'unité SI J/K peut être utilisée pour exprimer la valeur de la capacité thermique et celle de l'entropie). Il ne suffit donc pas, et c'est important, d'indiquer le nom de l'unité pour spécifier la grandeur mesurée. Cette règle s'applique non seulement aux textes scientifiques et techniques mais aussi, par exemple, aux appareils de mesure (c'est-à-dire qu'ils doivent porter non seulement l'indication de l'unité mais aussi l'indication de la grandeur mesurée).

Les grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un, sont généralement définies comme le rapport de deux grandeurs de même nature (par exemple, l'indice de réfraction est le rapport de deux vitesses, et la perméabilité relative est le rapport entre la perméabilité d'un milieu diélectrique et celle du vide). L'unité SI des grandeurs sans dimension est le rapport de deux unités SI identiques ; elle est toujours égale à un. Toutefois lorsqu'on exprime la valeur des grandeurs sans dimension, l'unité « un », 1, n'est pas mentionnée explicitement.

### Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI

Une série de préfixes, à utiliser avec les unités SI, ont été adoptés pour exprimer les valeurs des grandeurs beaucoup plus grandes ou plus petites que l'unité SI elle-même. Les préfixes SI figurent au tableau 5. Ils peuvent être utilisés avec toutes les **unités de base** et les **unités dérivées** ayant des noms spéciaux.

Tableau 5 *Préfixes SI*

Facteur	Nom	Symbole	Facteur	Nom	Symbole
10 <sup>1</sup>	déca	da	10 <sup>-1</sup>	déci	d
10 <sup>2</sup>	hecto	h	10 <sup>-2</sup>	centi	c
10 <sup>3</sup>	kilo	k	10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>6</sup>	méga	M	10 <sup>-6</sup>	micro	μ
10 <sup>9</sup>	giga	G	10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>12</sup>	téra	T	10 <sup>-12</sup>	pico	p
10 <sup>15</sup>	péta	P	10 <sup>-15</sup>	femto	f
10 <sup>18</sup>	exa	E	10 <sup>-18</sup>	atto	a
10 <sup>21</sup>	zetta	Z	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>24</sup>	yotta	Y	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

Lorsque l'on utilise ces préfixes, le nom du préfixe et celui de l'unité sont composés pour former un mot unique et, de même, le symbole du préfixe et celui de l'unité forment un nouveau symbole, sans espace, qui peut lui-même être élevé à une puissance. Par exemple, nous pouvons écrire : kilomètre, km ; microvolt, μV ; femtoseconde, fs ; 50 V/cm = 50 V (10<sup>-2</sup> m)<sup>-1</sup> = 5000 V/m.

L'ensemble des **unités de base** et des **unités dérivées**, utilisées sans préfixe, forme l'ensemble des **unités cohérentes**, dont l'utilisation présente des avantages techniques (cf **Brochure sur le SI**).

Cependant, l'utilisation de préfixes est commode parce qu'elle évite d'utiliser des puissances de 10 pour exprimer les valeurs de grandeurs très grandes ou très petites. Par exemple, il est plus commode d'exprimer la longueur d'une liaison chimique en nanomètres, nm, qu'en mètres, m, et la distance entre Londres et Paris en kilomètres, km, qu'en mètres, m.

Le kilogramme, kg, fait exception à cette règle, car c'est une **unité de base** dont le nom, pour des raisons historiques, contient déjà un préfixe. Les multiples et sous-multiples du kilogramme sont formés par l'adjonction de préfixes au mot gramme : ainsi nous écrivons milligramme, mg, et pas micro-kilogramme, μkg.

### Unités en dehors du SI

Parce que le SI est le seul système d'unités reconnu au niveau mondial, il a l'avantage manifeste d'établir un langage universel. Les autres unités, c'est-à-dire les unités en dehors du SI, sont généralement définies en fonction des unités SI. L'utilisation du SI simplifie aussi l'enseignement des sciences. Pour toutes ces raisons, l'utilisation des unités SI est recommandée dans tous les domaines des sciences et de la technologie.

Toutefois, certaines unités en dehors du SI sont encore largement utilisées, par exemple les unités de temps, comme la minute, l'heure et le jour, qui sont profondément ancrées dans la culture humaine. D'autres unités continuent à l'être pour des raisons historiques, afin de répondre aux besoins de certains groupes d'intérêt, ou parce qu'il n'existe pas d'alternative commode dans le SI. Les scientifiques doivent avoir la liberté d'utiliser des unités en dehors du SI, s'ils y trouvent un avantage particulier dans leur travail. Cependant, il faut toujours les accompagner des facteurs de conversion au SI. Quelques unités en dehors du SI figurent au tableau 6 ci-dessous, accompagnées de leur facteur de conversion au SI. Une liste plus complète se trouve dans la **Brochure sur le SI** et sur le site Web du BIPM.

Tableau 6 *Quelques unités en dehors du SI*

Grandeur	Unité	Symbole	Valeur en unités SI
temps	minute	min	1 min = 60 s
	heure	h	1 h = 3600 s
	jour	d	1 d = 86 400 s
volume	litre	L ou l	1 L = 1 dm <sup>3</sup>
masse	tonne	t	1 t = 1000 kg
énergie	électronvolt	eV	1 eV ≈ 1,602 × 10 <sup>-19</sup> J
	pression	bar	1 bar = 100 kPa
longueur	millimètre de mercure	mmHg	1 mmHg ≈ 133,3 Pa
	ångström	Å	1 Å = 10 <sup>-10</sup> m
force	mille marin	M	1 M = 1852 m
force	dyne	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
énergie	erg	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J

Les symboles des unités commencent par une majuscule si le nom de l'unité dérive d'un nom propre (par exemple, ampère, A ; kelvin, K ; hertz, Hz ; coulomb, C). Sinon, ils commencent par une minuscule (par exemple, mètre, m ; seconde, s ; mole, mol). Le symbole du litre constitue une exception à cette règle : il est

possible d'utiliser la lettre L en majuscule afin d'éviter la confusion entre le chiffre 1 (un) et la lettre l en minuscule.

Le symbole du mille marin donné au tableau 6 est M ; il faut cependant noter qu'il n'existe pas de symbole universellement approuvé pour le mille marin.

### Le langage des sciences : utilisation du SI pour exprimer les valeurs des grandeurs

La valeur d'une grandeur s'exprime comme le produit d'un nombre par une unité ; le nombre qui multiplie l'unité est la valeur numérique de la grandeur exprimée au moyen de cette unité. On laisse toujours un espace entre le nombre et l'unité. Pour les grandeurs sans dimension, dont l'unité est le nombre un, l'unité « un » n'est pas mentionnée explicitement. La valeur numérique d'une grandeur particulière dépend du choix de l'unité et est donc différente selon l'unité choisie, comme le montrent les exemples ci-dessous :

La vitesse d'une bicyclette est d'environ

$$v = 5,0 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h.}$$

La longueur d'onde d'une des raies jaunes du sodium est égale à  $\lambda = 5,896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589,6 \text{ nm}$ .

Les symboles des grandeurs sont en général formés d'une seule lettre de l'alphabet latin ou grec, en majuscule ou en minuscule, en italique. Ils peuvent être précisés par des informations complémentaires en indice, ou entre parenthèses.

Des autorités telles que l'ISO (l'Organisation internationale de normalisation) et diverses unions scientifiques internationales telles que l'UIPPA et l'UICPA ont recommandé des symboles pour beaucoup de grandeurs ; par exemple :

- $T$  pour la température
- $C_p$  pour la capacité thermique à pression constante
- $x_i$  pour la fraction molaire d'une espèce  $i$
- $\mu_r$  pour la perméabilité relative
- $m(\mathcal{K})$  pour la masse du prototype international du kilogramme  $\mathcal{K}$ .

Les symboles des unités sont imprimés en caractères romains (droits), quelle que soit la police employée dans le texte où ils figurent. Ce sont des entités mathématiques et pas des abréviations. Ils ne doivent donc pas être suivis d'un point, sauf s'ils se trouvent placés à la fin d'une phrase, et restent invariables au pluriel. Les symboles des unités peuvent quelquefois être composés de plusieurs lettres. Ils sont écrits en minuscules, mais, si le nom de l'unité dérive d'un nom propre, la première lettre du symbole est majuscule. Toutefois le nom de l'unité commence par une minuscule (sauf en début de phrase), afin de distinguer le nom de l'unité de celle du nom propre. L'utilisation correcte des symboles des unités SI, et des unités en général, est obligatoire. Ceci est illustré par de nombreux exemples dans la **Brochure sur le SI**.

Lorsque l'on exprime la valeur d'une grandeur comme le produit d'un nombre et d'une unité, le nombre et l'unité suivent les règles classiques de l'algèbre. Par exemple, l'équation  $T = 293 \text{ K}$  peut aussi s'écrire  $T/K = 293$ . Une telle démarche correspond à l'utilisation du calcul formel. Ceci est souvent utilisé pour les entêtes de colonne des tableaux ou les axes des graphiques, afin que le contenu du tableau ou les marques sur l'axe soient des nombres. L'exemple ci-dessous montre une table de pression de vapeur en fonction de la température, et le logarithme de la pression de vapeur en fonction de la température à la puissance moins un :

$T/K$	$10^3 \text{ K}/T$	$p/\text{MPa}$	$\ln(p/\text{MPa})$
216,55	4,6179	0,5180	-0,6578
273,15	3,6610	3,4853	1,2486
304,19	3,2874	7,3815	1,9990

Des formes équivalentes du point de vue algébrique peuvent être utilisées à la place de  $10^3 \text{ K}/T$ , comme  $\text{kK}/T$ , ou  $10^3 (T/\text{K})^{-1}$ .

Les règles classiques de l'algèbre s'appliquent pour former les produits et quotients d'unités. La multiplication doit être indiquée par un espace ou un point à mi-hauteur centré. L'espace est important car, par exemple,  $\text{m s}$  désigne le produit d'un mètre par une seconde, mais  $\text{ms}$  désigne une milliseconde. Lorsque l'on combine plusieurs symboles d'unités, il faut prendre soin d'éviter toute ambiguïté, en utilisant des parenthèses ou des exposants négatifs. Par exemple, la constante molaire des gaz  $R$  s'exprime sous la forme :

$$pV_m/T = R = 8,314 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\ = 8,314 \text{ Pa m}^3/(\text{mol K}).$$

Lorsque l'on écrit un nombre, le séparateur décimal utilisé pour séparer la partie entière de la partie décimale peut être le point ou la virgule, selon le contexte. Pour les documents en anglais, il est d'usage d'utiliser le point, mais de nombreuses autres langues, en vigueur dans les pays européens en particulier, utilisent la virgule.

Il est d'usage de séparer en tranches de trois chiffres, de part et d'autre du séparateur décimal, les nombres comportant un grand nombre de chiffres. Ce n'est pas fondamental, mais cette règle est souvent appliquée car elle est utile. Ces tranches sont séparées par un espace et ne sont jamais séparées par des points, ni par des virgules.

L'incertitude associée à la valeur numérique d'une grandeur peut souvent être exprimée en donnant entre parenthèses, après la valeur, l'incertitude-type sur les derniers chiffres significatifs.

Par exemple : La valeur de la charge électrique élémentaire est exprimée dans la liste des constantes fondamentales de CODATA de 2002 sous la forme

$e = 1,602\ 176\ 53\ (14) \times 10^{-19} \text{ C}$ , où 14 est l'incertitude-type sur les derniers chiffres de la valeur numérique.

Pour plus d'information, vous pouvez consulter le site Web du BIPM, ou la 8<sup>e</sup> édition de la **Brochure sur le SI**, à l'adresse



<http://www.bipm.org>

Ce résumé a été préparé par le Comité consultatif des unités (CCU) du Comité international des poids et mesures (CIPM). Il est publié par le BIPM.

Mars 2006

Ernst Göbel, président du CIPM

Ian Mills, président du CCU

Andrew Wallard, directeur du BIPM