



Le Système international d'unités **The International System of Units**

SI

**8^e édition
2006**

**Bureau
international
des poids
et mesures**

**Organisation
intergouvernementale
de la Convention
du Mètre**



**Le Système international
d'unités (SI)**

English version

**The International
System of Units (SI)**

**Bureau international
des poids et mesures**

**Le Système
international d'unités
(SI)**

8^e édition 2006

**Organisation intergouvernementale
de la Convention du Mètre**

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 93)

Afin de mieux faire connaître ses travaux, le Comité international des poids et mesures publie une version en anglais de ses documents. Le lecteur doit cependant noter que le texte officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est celui-ci qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.

Des traductions complètes ou partielles de cette brochure (ou de ses précédentes éditions) sont publiées en diverses langues, notamment en allemand, anglais, bulgare, chinois, coréen, espagnol, japonais, portugais, roumain, tchèque. L'ISO et de nombreux pays ont aussi publié des guides pour l'emploi des unités SI.

Édité par le BIPM,
Pavillon de Breteuil,
F-92312 Sèvres Cedex
France

Imprimé par : STEDI Media, Paris

ISBN 92-822-2213-6

Le BIPM et la Convention du Mètre

Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) a été créé par la Convention du Mètre signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau international a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre.

Le Bureau international a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures ; il est donc chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles pour la mesure des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux ;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux ;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes ;
- d'effectuer et de coordonner les mesures des constantes physiques fondamentales qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau international fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité international des poids et mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) à laquelle il présente son rapport sur les travaux accomplis par le Bureau international.

La Conférence générale rassemble des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans dans le but :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système international d'unités (SI), forme moderne du Système métrique ;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et d'adopter diverses résolutions scientifiques de portée internationale ;
- d'adopter toutes les décisions importantes concernant la dotation, l'organisation et le développement du Bureau international.

Le Comité international comprend dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau international. La principale mission du Comité international est d'assurer l'unification mondiale des unités de mesure, en agissant directement, ou en soumettant des propositions à la Conférence générale.

Au 31 décembre 2005, cinquante et un États étaient membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine, Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominica (Rép.), Égypte, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Malaisie, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Serbie-et-Monténégro, Singapour, Slovaquie, Suède, Suisse, Tchèque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Vingt États et entités économiques sont Associés à la Conférence générale : Bélarus, CARICOM, Costa Rica, Croatie, Cuba, Équateur, Estonie, Hong Kong (Chine), Jamaïque, Kazakhstan, Kenya, Lettonie, Lituanie, Malte, Panama, Philippines, Slovaquie, Taipei chinois, Ukraine, Viet Nam.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau international ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques et radiométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960), aux échelles de temps (1988) et à la chimie (2000). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers, en 1988 pour la bibliothèque et des bureaux, et en 2001 a été inauguré un bâtiment pour l'atelier, des bureaux et des salles de réunion.

Environ quarante-cinq physiciens et techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié dans le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau international en 1927, le Comité international a institué, sous le nom de Comités consultatifs, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités consultatifs, qui peuvent créer des groupes de travail temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer au Comité international des recommandations concernant les unités.

Les Comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **31**, 97). Ils tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers. Le président de chaque Comité consultatif est désigné par le Comité international ; il est généralement membre du Comité international. Les Comités consultatifs ont pour membres des laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés, dont la liste est établie par le Comité international, qui envoient des délégués de leur choix. Ils comprennent aussi des membres nominativement désignés par le Comité international, et un représentant du Bureau international (Critères pour être membre des Comités consultatifs, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1996, **64**, 6). Ces Comités sont actuellement au nombre de dix :

1. Le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif d'électricité (CCE) créé en 1927 ;
2. Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le CCE s'est occupé des questions de photométrie) ;
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937 ;
4. Le Comité consultatif des longueurs (CCL), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) créé en 1952 ;
5. Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) créé en 1956 ;
6. Le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) créé en 1958 (en 1969, ce Comité consultatif a institué

quatre sections : Section I (Rayons x et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;

7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le Comité international en 1954) ;
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980 ;
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie (CCQM), créé en 1993 ;
10. Le Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations (CCAUV), créé en 1999.

Les travaux de la Conférence générale et du Comité international sont publiés par les soins du Bureau international dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures* ;
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures*.

Le Comité international a décidé en 2003 que les rapports des sessions des Comités consultatifs ne seraient plus imprimés, mais placés sur le site Web du BIPM, dans leur langue originale.

Le Bureau international publie aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre *Le Système international d'unités (SI)*, une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

La collection des *Travaux et mémoires du Bureau international des poids et mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée par décision du Comité international, de même que le *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (11 volumes publiés de 1966 à 1988).

Les travaux du Bureau international font l'objet de publications dans des journaux scientifiques ; une liste en est donnée chaque année dans le *Rapport du directeur sur l'activité et la gestion du Bureau international des poids et mesures*.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité international des poids et mesures, publie des articles sur la métrologie scientifique, sur l'amélioration des méthodes de mesure, les travaux sur les étalons et sur les unités, ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

Le Système international d'unités

Table des matières

Le BIPM et la Convention du Mètre	5
Préface à la 8^e édition	11
 1 Introduction	 13
1.1 Grandeurs et unités	13
1.2 Le Système international d'unités (SI) et le système de grandeurs correspondant	14
1.3 Dimension des grandeurs	15
1.4 Unités cohérentes, unités dérivées ayant des noms spéciaux et préfixes SI	16
1.5 Les unités SI dans le cadre de la relativité générale	17
1.6 Unités des grandeurs décrivant des effets biologiques	17
1.7 Législation sur les unités	18
1.8 Note historique	18
 2 Unités SI	 21
2.1 Unités SI de base	21
2.1.1 Définitions	21
2.1.1.1 Unité de longueur (mètre)	22
2.1.1.2 Unité de masse (kilogramme)	22
2.1.1.3 Unité de temps (seconde)	22
2.1.1.4 Unité de courant électrique (ampère)	23
2.1.1.5 Unité de température thermodynamique (kelvin)	23
2.1.1.6 Unité de quantité de matière (mole)	24
2.1.1.7 Unité d'intensité lumineuse (candela)	26
2.1.2 Symboles des sept unités de base	26
2.2 Unités SI dérivées	27
2.2.1 Unités dérivées exprimées à partir des unités de base	27
2.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités faisant appel à des noms spéciaux et des symboles particuliers	27
2.2.3 Unités des grandeurs sans dimension, aussi désignées grandeurs de dimension un	30
 3 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI	 32
3.1 Préfixes SI	32
3.2 Le kilogramme	33

4 Unités en dehors du SI	34
4.1 Unités en dehors du SI en usage avec le SI et unités fondées sur des constantes fondamentales	34
4.2 Autres unités en dehors du SI dont l'usage n'est pas recommandé	40
5 Règles d'écriture des noms et symboles d'unités et expression des valeurs des grandeurs	41
5.1 Symboles des unités	41
5.2 Noms des unités	42
5.3 Règles et conventions stylistiques servant à exprimer les valeurs des grandeurs	42
5.3.1 Valeur et valeur numérique d'une grandeur ; utilisation du calcul formel	42
5.3.2 Symboles des grandeurs et des unités	44
5.3.3 Écriture de la valeur d'une grandeur	44
5.3.4 Écriture des nombres et séparateur décimal	44
5.3.5 Expression de l'incertitude de mesure associée à la valeur d'une grandeur	45
5.3.6 Multiplication ou division des symboles des grandeurs, des valeurs des grandeurs et des nombres	45
5.3.7 Valeur des grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un	45
Annexe 1. — Décisions de la Conférence générale des poids et mesures et du Comité international des poids et mesures	47
Annexe 2. — Réalisation pratique des définitions des principales unités	83
Annexe 3. — Unités pour la mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques	85
Liste des sigles	87
Index	89

Préface à la 8^e édition

Nous avons le plaisir d'introduire la 8^e édition de cette publication, communément appelée Brochure sur le SI, qui définit et présente le Système international d'unités, le SI. Cette brochure est publiée en version papier ; elle est aussi disponible sous forme électronique sur le site Internet du BIPM à l'adresse www.bipm.org/fr/si/si_brochure/.

Depuis 1970, le Bureau international des poids et mesures, le BIPM, a déjà publié sept éditions de ce document. Son but principal est de définir et promouvoir le SI, qui est utilisé dans le monde entier comme langage préféré dans les domaines des sciences et de la technologie, depuis son adoption en 1948 par la 9^e Conférence générale des poids et mesures, la CGPM.

Le SI est, bien sûr, un système évolutif, qui reflète les meilleures pratiques en matière de mesure du moment. Cette 8^e édition contient donc un certain nombre de changements par rapport à la précédente édition. Comme auparavant, elle donne les définitions de toutes les unités de base, ainsi que les Résolutions et Recommandations de la Conférence générale des poids et mesures et du Comité international des poids et mesures (CIPM) concernant le Système international d'unités. Les références officielles de ces décisions se trouvent dans les volumes successifs des *Comptes rendus* de la Conférence générale (CR) et des *Procès-verbaux* du Comité international (PV) ; un grand nombre d'entre elles ont aussi été publiées dans *Metrologia*. Pour simplifier l'utilisation pratique du Système international, le texte fournit des explications à propos de ces décisions, et le premier chapitre présente une introduction générale sur l'établissement des systèmes d'unités et du SI en particulier. Les définitions et réalisations de toutes les unités sont aussi examinées dans le contexte de la relativité générale. Pour la première fois, cette brochure comporte aussi une brève discussion des unités associées aux grandeurs biologiques.

L'annexe 1 reproduit, par ordre chronologique, toutes les décisions (Résolutions, Recommandations, déclarations) promulguées depuis 1889 par la Conférence générale et par le Comité international sur les unités de mesure et le Système international d'unités.

L'annexe 2 existe uniquement sous forme électronique et est accessible à l'adresse www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/. Elle met l'accent sur la réalisation pratique de certaines unités importantes, en accord avec les définitions données dans le texte principal. Ceci est utile aux laboratoires de métrologie pour réaliser les unités physiques et pour étalonner les étalons matériels et les instruments de mesure de la plus haute qualité. Cette annexe sera mise à jour régulièrement pour refléter les progrès des techniques expérimentales utilisées pour réaliser les unités.

L'annexe 3 présente les unités utilisées pour la mesure des effets actiniques dans les matériaux biologiques.

Le Comité consultatif des unités du CIPM, le CCU, est responsable de la préparation de ce document ; le CCU et le CIPM ont tous deux approuvé le texte final. Cette 8^e édition est une révision de la 7^e édition (1998) ; elle prend en compte les décisions de la Conférence générale et du Comité international depuis la publication de la 7^e édition.

Depuis plus de trente-cinq ans, ce document est utilisé comme ouvrage de référence dans de nombreux pays, organisations et unions scientifiques. Afin de rendre son contenu accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs, le Comité international a décidé, en 1985, de publier une version en anglais du texte de la 5^e édition ; les éditions ultérieures ont conservé cette présentation bilingue. Pour la première édition en anglais, le BIPM s'est efforcé de produire une traduction fiable du texte original en collaboration étroite avec le National Physical Laboratory (Teddington, Royaume-Uni) et avec le National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, États-Unis), qui s'appelait à l'époque le National Bureau of Standards. Dans la présente édition, les versions française et anglaise ont été préparées par le CCU en collaboration étroite avec le BIPM.

La 22^e Conférence générale a décidé, en 2003, de suivre la décision prise par le Comité international en 1997 : « le symbole du séparateur décimal pourra être soit le point sur la ligne, soit la virgule sur la ligne. » D'après cette décision, et suivant l'usage dans les deux langues, on utilise dans cette édition le point sur la ligne comme séparateur décimal en anglais, et la virgule sur la ligne en français. Cette pratique n'a aucune implication en ce qui concerne la traduction du séparateur décimal dans les autres langues. Il faut noter qu'il existe de petites variations dans l'orthographe de certains mots en anglais (par exemple, « metre » et « meter », « litre » et « liter »). Le texte anglais publié ici suit la norme ISO 31, *Grandeurs et unités*.

Le lecteur doit cependant noter que le texte officiel est celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a un doute sur l'interprétation.

Mars 2006



E. Göbel
Président du CIPM



I. M. Mills
Président du CCU



A. J. Wallard
Directeur du BIPM

1 Introduction

1.1 Grandeurs et unités

La valeur d'une grandeur est généralement exprimée sous la forme du produit d'un nombre par une unité. L'unité n'est qu'un exemple particulier de la grandeur concernée, utilisé comme référence. Le nombre est le rapport entre la valeur de la grandeur en question et l'unité. Pour une grandeur particulière, on peut utiliser de nombreuses unités différentes. Par exemple, la vitesse v d'une particule peut être exprimée sous la forme $v = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$, les unités mètre par seconde et kilomètre par heure étant des unités alternatives pour exprimer la même valeur de la grandeur « vitesse ». Cependant, comme il est important de disposer d'un ensemble d'unités bien définies, universellement reconnues et faciles à utiliser pour la multitude des mesures qui confortent l'assise de notre société, les unités choisies doivent être accessibles à tous, supposées constantes dans le temps et l'espace, et faciles à réaliser avec une exactitude élevée.

Pour établir un système d'unités, comme le Système international d'unités, le SI, il est nécessaire tout d'abord d'établir un système de grandeurs et une série d'équations définissant les relations entre ces grandeurs. Ceci est nécessaire parce que les équations reliant les grandeurs entre elles déterminent celles reliant les unités entre elles, comme décrit dans la suite de ce document. Il est commode aussi de choisir les définitions d'un nombre restreint d'unités que nous appelons les *unités de base*, et de définir ensuite les unités des autres grandeurs comme produits de puissances des unités de base, que nous appelons les *unités dérivées*. De manière similaire, les grandeurs correspondantes sont décrites comme *grandeurs de base* et *grandeurs dérivées*, et les équations donnant les grandeurs dérivées en fonction des grandeurs de base sont utilisées pour exprimer les unités dérivées en fonction des unités de base (voir 1.4 ci-dessous). Il est donc logique que le choix des grandeurs et des équations reliant les grandeurs précède celui des unités.

Du point de vue scientifique, la division des grandeurs en grandeurs de base et grandeurs dérivées est affaire de convention ; ce n'est pas fondamental pour la compréhension de la physique sous-jacente. Toutefois, pour ce qui concerne les unités, il est important que la définition de chaque unité de base soit effectuée avec un soin particulier, afin de satisfaire aux exigences mentionnées au premier paragraphe ci-dessus, puisqu'elles assurent le fondement du système d'unités tout entier. La définition des unités dérivées en fonction des unités de base découle des équations définissant les grandeurs dérivées en fonction des grandeurs de base. Ainsi l'établissement d'un système d'unités, qui constitue le sujet de cette brochure, est intimement lié aux équations algébriques reliant les grandeurs correspondantes.

Le nombre de grandeurs dérivées importantes pour la science et la technologie est bien sûr sans limite. Lorsque de nouveaux domaines scientifiques se développent, de nouvelles grandeurs sont introduites par les chercheurs afin de représenter les propriétés du domaine, et ces nouvelles grandeurs engendrent de nouvelles équations

Les termes **grandeur** et **unité** sont définis dans le *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de la métrologie*, le VIM.

La grandeur vitesse, v , peut être exprimée en fonction des grandeurs distance parcourue, x , et durée du parcours, t , au moyen de l'équation $v = dx/dt$.

Dans la plupart des systèmes de grandeurs et d'unités, la distance x et le temps t sont considérés comme des grandeurs de base, pour lesquelles on peut choisir comme unités de base le mètre (symbole m) et la seconde (symbole s). La vitesse v est ainsi considérée comme une grandeur dérivée, dont l'unité est le mètre par seconde (symbole m/s).

Par exemple, en électrochimie, la mobilité électrique d'un ion, u , est définie comme le rapport entre sa vitesse v et l'intensité du champ électrique E : $u = v/E$. L'unité de mobilité électrique est donc donnée sous la forme : $(\text{m/s})/(\text{V/m}) = \text{m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, et peut être aisément reliée aux unités de base choisies (V est le symbole du volt, unité dérivée du SI).

afin de les relier aux grandeurs familières, puis aux grandeurs de base. Ainsi les unités dérivées à utiliser avec ces nouvelles grandeurs peuvent être définies comme le produit de puissances d'unités de base choisies précédemment.

1.2 Le Système international d'unités (SI) et le système de grandeurs correspondant

Cette brochure a pour objet de présenter les informations nécessaires à la définition et à l'utilisation du Système international d'unités, universellement connu sous l'abréviation SI. Le SI a été établi et défini par la Conférence générale des poids et mesures, la CGPM (*voir* la Note historique section 1.8 ci-dessous)*.

Le nom *Système international d'unités*, et l'abréviation SI, ont été établis par la 11^e CGPM en 1960.

Le système de grandeurs à utiliser avec le SI, y compris les équations reliant ces grandeurs entre elles, correspond en fait aux grandeurs et équations de la physique, bien connues de tous les scientifiques, techniciens et ingénieurs. Elles figurent dans tous les manuels et dans de nombreuses publications de référence, mais toute liste ne constitue qu'une sélection parmi les grandeurs et équations existantes, lesquelles sont en nombre illimité. Un grand nombre de grandeurs, leurs noms et symboles recommandés et les équations les reliant les unes aux autres, sont mentionnés dans les normes internationales ISO 31 et CEI 60027 produites par le Comité technique 12 de l'Organisation internationale de normalisation, l'ISO/TC 12, et par le Comité technique 25 de la Commission électrotechnique internationale, CEI/TC 25. Les normes ISO 31 et CEI 60027 sont en cours de révision par ces deux organisations de normalisation, qui y travaillent conjointement. La norme révisée par ces deux organisations constituera la norme ISO/CEI 80000, *Grandeurs et unités*, dans laquelle il est proposé que l'ensemble des grandeurs et équations utilisées avec le SI soit désigné sous le nom de Système international de grandeurs.

L'équation newtonienne d'inertie reliant la force F à la masse m et à l'accélération a d'une particule : $F = ma$, et l'équation donnant l'énergie cinétique T d'une particule en mouvement à la vitesse v : $T = mv^2/2$ sont des exemples d'équations aux grandeurs utilisées avec le SI.

Les grandeurs de base utilisées dans le SI 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 sont, par convention, considérées comme indépendantes. Les unités de base correspondantes du SI, choisies par la CGPM, sont le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. Les définitions de ces unités de base sont données dans la section 2.1.1 au chapitre suivant. Les unités dérivées du SI sont ensuite formées des produits de puissances des unités de base, selon les relations algébriques qui définissent les grandeurs dérivées correspondantes en fonction des grandeurs de base (*voir* 1.4 ci-dessous).

À de rares occasions, on a le choix entre plusieurs formes de relations entre les grandeurs. Un exemple particulièrement important concerne la définition des grandeurs électromagnétiques. Les équations électromagnétiques rationalisées à quatre grandeurs, utilisées avec le SI, sont fondées sur la longueur, la masse, le temps et le courant électrique. Dans ces équations, la constante électrique ϵ_0 (la permittivité du vide) et la constante magnétique μ_0 (la perméabilité du vide) ont des dimensions et des valeurs qui vérifient l'équation $\epsilon_0\mu_0 = 1/c_0^2$, où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide. La loi de Coulomb décrit la force électrostatique entre deux particules de charges q_1 et q_2 à une distance r sous la forme** :

* Les sigles utilisés dans cette brochure et leur signification figurent à la page 87.

** Les vecteurs sont exprimés par des symboles en caractères gras.

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

et l'équation de la force magnétique s'exerçant entre deux éléments de fils électriques minces parcourus par des courants électriques, $i_1 d\mathbf{l}_1$ and $i_2 d\mathbf{l}_2$, est exprimée sous la forme suivante :

$$d^2\mathbf{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1 d\mathbf{l}_1 \times (i_2 d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{r})}{r^3}$$

où $d^2\mathbf{F}$ est la différentielle seconde de la force $\mathbf{F}$. Ces équations, sur lesquelles le SI est fondé, sont différentes de celles utilisées dans les systèmes CGS-UES, CGS-UEM et CGS de Gauss, dans lesquelles ϵ_0 et μ_0 sont des grandeurs sans dimension, choisies comme étant égales à un, et où les facteurs de rationalisation 4π sont omis.

1.3 Dimension des grandeurs

Par convention, les grandeurs physiques sont organisées selon un système de dimensions. Chacune des sept grandeurs de base du SI est supposée avoir sa propre dimension, représentée symboliquement par une seule lettre majuscule sans empattement en romain. Les symboles utilisés pour les grandeurs de base, et les symboles utilisés pour indiquer leur dimension, sont les suivants :

Grandeurs de base et dimensions utilisées avec le SI

Grandeur de base	Symbole de la grandeur	Symbole de la dimension
longueur	$l, x, r, \text{etc.}$	L
masse	m	M
temps, durée	t	T
courant électrique	I, i	I
température thermodynamique	T	Θ
quantité de matière	n	N
intensité lumineuse	I_v	J

Les symboles des grandeurs sont toujours écrits en italique alors que les symboles des dimensions sont écrits en majuscules sans empattement en romain.

Pour certaines grandeurs, il est possible d'utiliser différents symboles, comme indiqué pour la longueur ou le courant électrique.

Notons que les symboles donnés pour les grandeurs ne sont que *recommandés*. Par contre, les symboles donnés pour les unités dans cette brochure, ainsi que leur style et leur forme, sont ceux qui doivent être *obligatoirement* utilisés (voir chapitre 5).

Les symboles des dimensions et les exposants sont traités selon les règles ordinaires de l'algèbre. Par exemple, la dimension pour la superficie s'écrit L^2 ; la dimension pour la vitesse LT^{-1} ; la dimension pour la force MT^{-2} ; et la dimension pour l'énergie L^2MT^{-2} .

Toutes les autres grandeurs sont des grandeurs dérivées, qui peuvent être exprimées en fonction des grandeurs de base à l'aide des équations de la physique. Les dimensions des grandeurs dérivées sont écrites sous la forme de produits de puissances des dimensions des grandeurs de base au moyen des équations qui relient les grandeurs dérivées aux grandeurs de base. En général la dimension d'une grandeur Q s'écrit sous la forme d'un produit dimensionnel,

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

où les exposants $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta$ et η , qui sont en général de petits nombres entiers, positifs, négatifs ou nuls, sont appelés exposants dimensionnels. L'information fournie par la dimension d'une grandeur dérivée sur la relation entre cette grandeur et les grandeurs de base est la même que celle contenue dans l'unité SI pour la grandeur dérivée, elle-même obtenue comme produit de puissances des unités de base du SI.

Certaines grandeurs dérivées Q sont définies par une équation aux grandeurs telle que tous les exposants dimensionnels entrant dans l'expression de la dimension de Q sont égaux à zéro. C'est vrai, en particulier, pour une grandeur définie comme le rapport entre deux grandeurs de même nature. Ces grandeurs sont décrites comme étant *sans dimension*, ou *de dimension un*. L'unité cohérente dérivée de telles grandeurs est toujours le nombre un, 1, puisque c'est le rapport entre les unités de deux grandeurs de même nature, donc identiques.

Il existe également des grandeurs qui ne peuvent pas être décrites au moyen des sept grandeurs de base du SI, mais dont la valeur est déterminée par comptage. Par exemple le nombre de molécules, la dégénérescence en mécanique quantique (le nombre d'états indépendants ayant la même énergie) et la fonction de partition en thermodynamique statistique (le nombre d'états thermiques accessibles). Ces grandeurs sont aussi habituellement considérées comme sans dimension, ou de dimension un, et ont pour unité le nombre un, 1.

Par exemple, l'indice de réfraction d'un milieu est défini comme le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle dans ce milieu ; c'est le rapport entre deux grandeurs de même nature. C'est donc une grandeur sans dimension.

D'autres exemples de grandeurs sans dimension sont : l'angle plan, la fraction massique, la permittivité relative, la perméabilité relative, et la finesse d'une cavité Perot-Fabry.

1.4 Unités cohérentes, unités dérivées ayant des noms spéciaux et préfixes SI

Les unités dérivées sont définies comme le produit de puissances des unités de base. Quand le produit des puissances ne comprend pas de facteur numérique autre que 1, les unités dérivées sont appelées *unités dérivées cohérentes*. Les unités de base et les unités dérivées cohérentes du SI forment un ensemble cohérent, désigné sous le nom d'*ensemble cohérent des unités SI*. Le mot cohérent est utilisé ici dans le sens suivant : lorsque l'on utilise des unités cohérentes, les équations reliant les valeurs numériques des grandeurs prennent exactement la même forme que les équations reliant les grandeurs proprement dites. Ainsi, si l'on utilise uniquement des unités d'un ensemble cohérent, on n'a jamais besoin de facteurs de conversion entre les unités.

L'expression de l'unité cohérente d'une grandeur dérivée peut être obtenue à partir du produit dimensionnel de la grandeur en remplaçant le symbole de chaque dimension par le symbole de l'unité de base correspondante.

Certaines unités dérivées cohérentes du SI ont reçu des noms spéciaux, par souci de simplification (voir 2.2.2, p. 27). Il est important de souligner que chaque grandeur physique n'a qu'une seule unité SI cohérente, même si cette unité peut être exprimée sous différentes formes au moyen de noms spéciaux ou de symboles particuliers. L'inverse, toutefois, n'est pas vrai ; la même unité SI peut, dans certains cas, être employée pour exprimer les valeurs de plusieurs grandeurs différentes (voir p. 30).

Par exemple, la combinaison particulière des unités de base $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ a reçu le nom spécial joule, symbole J, quand elle est l'unité d'une énergie. Par définition $J = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$.

La Conférence générale a, de plus, adopté une série de préfixes pour la formation des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI cohérentes (voir 3.1, p. 32, la liste des noms de préfixes et de leur symbole). Ces préfixes sont commodes pour exprimer les valeurs de grandeurs beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que l'unité cohérente. Suivant la Recommandation 1 (1969) du Comité international (voir p. 65), ces préfixes sont désignés sous le nom de *préfixes SI*. (Ces préfixes sont aussi parfois utilisés avec des unités en dehors du SI, comme décrit dans le chapitre 4 de cette brochure). Cependant, quand un préfixe est utilisé avec une unité du SI, l'unité dérivée obtenue n'est plus cohérente, car le préfixe introduit un facteur numérique différent de 1 dans l'expression de l'unité dérivée en fonction des unités de base.

Par commodité, la longueur d'une liaison chimique est plus généralement exprimée en nanomètres, nm, qu'en mètres, m ; et la distance entre Londres et Paris est généralement exprimée en kilomètres, km, plutôt qu'en mètres, m.

Par dérogation à la règle, le nom du kilogramme, l'unité de base pour la masse, comprend le préfixe kilo, pour des raisons historiques. Il est néanmoins considéré

comme une unité de base du SI. Les multiples et sous-multiples du kilogramme sont formés en attachant des noms de préfixes au nom de l'unité « gramme » et des symboles de préfixes au symbole d'unité « g » (voir 3.2, p. 33). Ainsi 10^{-6} kg s'écrit milligramme, mg, et pas microkilogramme, μ kg.

L'ensemble des unités SI comprend l'ensemble des unités cohérentes et les multiples et sous-multiples de ces unités formés en les combinant aux préfixes SI. Il est désigné sous le nom d'*ensemble complet des unités SI*, ou simplement *unités SI*, ou *unités du SI*. Notons toutefois que les multiples et sous-multiples décimaux des unités du SI ne forment pas un ensemble cohérent.

Le mètre par seconde, symbole m/s, est l'unité SI cohérente de vitesse. Le kilomètre par seconde, km/s, le centimètre par seconde, cm/s, et le millimètre par seconde, mm/s, sont aussi des unités SI, mais ce ne sont pas des unités SI cohérentes.

1.5 Les unités SI dans le cadre de la relativité générale

Les définitions des unités de base du SI ont été adoptées dans un contexte qui ne tient pas compte des effets relativistes. Si l'on introduit une telle notion, il est clair que ces définitions ne s'appliquent que dans un petit domaine spatial qui accompagne dans leur mouvement les étalons qui les réalisent. Les unités de base du SI sont donc des *unités propres* ; leurs réalisations proviennent d'expériences locales, dans lesquelles les effets relativistes à prendre en compte sont ceux de la relativité restreinte. Les constantes de la physique sont des grandeurs locales dont la valeur est exprimée en unités propres.

Les réalisations physiques de la définition d'une unité sont généralement comparées au niveau local. Toutefois, pour les étalons de fréquence, il est possible d'effectuer de telles comparaisons à distance au moyen de signaux électromagnétiques. Pour interpréter les résultats, il est nécessaire de faire appel à la théorie de la relativité générale puisque celle-ci prédit, entre autres choses, un décalage de fréquence entre les étalons d'environ 1×10^{-16} en valeur relative par mètre d'altitude à la surface de la Terre. Des effets de cet ordre de grandeur ne peuvent être négligés lors de la comparaison des meilleurs étalons de fréquence.

La question des unités propres est traitée dans la Résolution A4 adoptée par la XXI^e Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) en 1991 et dans le rapport du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie (*Metrologia*, 1997, **34**, 261-290).

1.6 Unités des grandeurs décrivant des effets biologiques

Les unités des grandeurs décrivant des effets biologiques sont souvent difficiles à relier aux unités du SI parce qu'elles incluent habituellement des facteurs de pondération que l'on peut ne pas connaître ou définir avec précision, et qui peuvent dépendre à la fois de l'énergie et de la fréquence. Ces unités ne sont pas des unités du SI ; elles sont décrites brièvement dans cette section.

Les rayonnements optiques sont susceptibles de produire des modifications chimiques dans les matériaux vivants ou inertes. Cette propriété est appelée *actinisme* et les rayonnements capables de causer de tels changements sont connus sous le nom de *rayonnements actiniques*. Les résultats de mesure de certaines grandeurs photochimiques ou photobiologiques peuvent être exprimés en unités du SI. Cette question est discutée brièvement dans l'annexe 3 de cette brochure.

Le son cause de petites fluctuations de pression dans l'air, qui s'ajoutent à la pression atmosphérique normale, et qui sont perçues par l'oreille humaine. La sensibilité de l'oreille dépend de la fréquence sonore, et n'est pas une fonction simple de l'amplitude des variations de pression et de fréquence. Par conséquent, des grandeurs pondérées en fonction de la fréquence sont utilisées en acoustique pour donner une représentation approximative de la manière dont le son est perçu. Ces grandeurs sont

employées par exemple dans les études sur la protection contre les dommages auditifs. Les effets des ondes acoustiques ultrasonores sont source de préoccupations similaires dans le diagnostic médical et dans le domaine thérapeutique.

Les rayonnements ionisants déposent de l'énergie dans la matière irradiée. Le rapport entre l'énergie déposée et la masse est appelé *dose absorbée*. Des doses élevées de rayonnements ionisants tuent les cellules. Ceci est utilisé en radiothérapie et des fonctions de pondération biologiques appropriées sont utilisées pour comparer les effets thérapeutiques de différents traitements. De faibles doses non mortelles peuvent causer des dommages aux organismes vivants, par exemple induire un cancer ; ainsi les règlements relatifs à la radioprotection sont fondés sur des fonctions appropriées de pondération des risques pour les doses faibles.

Il existe une classe d'unités servant à quantifier l'activité biologique de certaines substances utilisées pour le diagnostic médical et la thérapie, qui ne peuvent pas encore être définies en fonction des unités du SI. En effet, le mécanisme de l'effet biologique spécifique qui donne à ces substances leur usage médical n'est pas encore suffisamment bien compris pour être quantifiable en fonction de paramètres physico-chimiques. Compte tenu de leur importance pour la santé humaine et la sécurité, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a pris la responsabilité de définir des unités internationales OMS pour l'activité biologique de ces substances.

1.7 Législation sur les unités

Les États fixent, par voie législative, les règles concernant l'utilisation des unités sur le plan national, soit pour l'usage général, soit pour certains domaines particuliers comme le commerce, la santé, la sécurité publique ou l'enseignement. Dans la plupart des pays, la législation est fondée sur l'emploi du Système international d'unités.

L'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), créée en 1955, s'occupe de l'harmonisation internationale de ces législations.

1.8 Note historique

Les paragraphes précédents de ce chapitre présentent brièvement comment un système d'unités, et le Système international d'unités en particulier, est établi. Cette note rend compte brièvement de l'évolution historique du Système international.

La 9^e CGPM (1948, Résolution 6 ; CR, 64), chargea le Comité international :

- d'étudier l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure ;
- d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays et
- de faire des recommandations sur l'établissement d'un *système pratique d'unités de mesure*, susceptible d'être adopté par tous les pays signataires de la Convention du Mètre.

Cette même Conférence générale adopta aussi la Résolution 7 (CR, 70) qui fixe des principes généraux pour l'écriture des symboles d'unités et donna une liste de quelques unités cohérentes ayant un nom spécial.

La 10^e CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) et la 14^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36) adoptèrent comme unités de base de ce système pratique d'unités les unités des sept grandeurs suivantes : longueur, masse, temps,

courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse.

La 11^e CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) adopta le nom *Système international d'unités*, avec l'abréviation internationale SI, pour ce système pratique d'unités et fixa des règles pour les préfixes, les unités dérivées et les unités supplémentaires (disparues depuis), et d'autres indications, établissant ainsi une réglementation d'ensemble pour les unités de mesure. Au cours des réunions qui suivirent, la Conférence générale et le Comité international étoffèrent et modifièrent selon les besoins la structure originelle du SI pour tenir compte des progrès de la science et des besoins des utilisateurs.

Il est possible de résumer comme suit les principales étapes historiques qui conduisirent à ces décisions importantes de la Conférence générale :

- La création du Système métrique décimal au moment de la Révolution française et le dépôt qui en a résulté, le 22 juin 1799, de deux étalons en platine représentant le mètre et le kilogramme aux Archives de la République à Paris peuvent être considérés comme la première étape ayant conduit au Système international d'unités actuel.
- En 1832, Gauss œuvra activement en faveur de l'application du Système métrique, associé à la seconde, définie en astronomie, comme système cohérent d'unités pour les sciences physiques. Gauss fut le premier à faire des mesures *absolues* du champ magnétique terrestre en utilisant un système décimal fondé sur les *trois unités mécaniques* millimètre, gramme et seconde pour, respectivement, les grandeurs longueur, masse et temps. Par la suite, Gauss et Weber ont étendu ces mesures pour y inclure d'autres phénomènes électriques.
- Dans les années 1860, Maxwell et Thomson mirent en œuvre de manière plus complète ces mesures dans les domaines de l'électricité et du magnétisme au sein de la British Association for the Advancement of Science (BAAS). Ils exprimèrent les règles de formation d'un *système cohérent d'unités* composé d'unités de *base* et d'unités *dérivées*. En 1874 la BAAS introduisit le *système CGS*, un système d'unités tri-dimensionnel cohérent fondé sur les trois unités mécaniques centimètre, gramme et seconde, et utilisant des préfixes allant de micro à méga pour exprimer les sous-multiples et multiples décimaux. C'est en grande partie sur l'utilisation de ce système que se fonda, par la suite, le développement expérimental des sciences physiques.
- Compléter de façon cohérente le système CGS pour les domaines de l'électricité et du magnétisme conduisit à choisir des unités d'amplitude peu adaptée à la pratique. Le BAAS et le Congrès international d'électricité, qui précéda la Commission électrotechnique internationale (CEI), approuvèrent, dans les années 1880, un système mutuellement cohérent d'*unités pratiques*. Parmi celles-ci figuraient l'ohm pour la résistance électrique, le volt pour la force électromotrice et l'ampère pour le courant électrique.
- Après la signature de la Convention du Mètre le 20 mai 1875, qui créa le Bureau international des poids et mesures et établit le Comité international et la Conférence générale, on fabriqua de nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, approuvés en 1889 par la 1^{re} CGPM. Avec la seconde des astronomes comme unité de temps, ces unités constituaient un système d'unités

mécaniques tri-dimensionnel similaire au système CGS, mais dont les unités de base étaient le mètre, le kilogramme et la seconde (système MKS).

- En 1901, Giorgi montra qu'il était possible de combiner les unités mécaniques du système mètre-kilogramme-seconde au système pratique d'unités électriques pour former un seul système cohérent quadri-dimensionnel en ajoutant à ces trois unités de base une quatrième unité, de nature électrique, telle que l'ampère ou l'ohm, et en rationalisant les équations utilisées en électromagnétisme. La proposition de Giorgi ouvrit la voie à d'autres extensions.
- Après la révision de la Convention du Mètre par la 6^e CGPM en 1921, qui étendit les attributions et les responsabilités du Bureau international à d'autres domaines de la physique, et la création du Comité consultatif d'électricité (CCE) par la 7^e CGPM qui en a résulté en 1927, la proposition de Giorgi fut discutée en détail par la CEI, l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) et d'autres organisations internationales. Ces discussions conduisirent le CCE à proposer, en 1939, l'adoption d'un système quadri-dimensionnel fondé sur le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère (système MKSA), une proposition qui fut approuvée par le Comité international en 1946.
- À la suite d'une enquête internationale effectuée par le Bureau international à partir de 1948, la 10^e CGPM, en 1954, approuva l'introduction de l'*ampère*, du *kelvin* et de la *candela* comme unités de base, respectivement pour le courant électrique, la température thermodynamique et l'intensité lumineuse. La 11^e CGPM donna le nom *Système international d'unités (SI)* à ce système en 1960. Lors de la 14^e CGPM, en 1971, après de longues discussions entre physiciens et chimistes pour trouver une définition capable de satisfaire les deux communautés, la *mole* fut ajoutée au SI comme unité de base pour la quantité de matière, portant à sept au total le nombre d'unités de base du SI tel que nous le connaissons aujourd'hui.

2 Unités SI

2.1 Unités SI de base

Les définitions officielles de toutes les unités de base du SI sont approuvées par la Conférence générale. La première de ces définitions fut approuvée en 1889 et la plus récente en 1983. Ces définitions sont modifiées de temps à autre pour suivre l'évolution des sciences.

2.1.1 Définitions

Les définitions actuelles des unités de base, chacune extraite du volume des *Comptes rendus* de la Conférence générale (CR) qui l'a approuvée, apparaît ici en retrait et en caractères gras sans empattement. Les décisions de nature explicative qui ne font pas partie intégrante de la définition, extraites des *Comptes rendus* de la Conférence générale ou des *Procès-verbaux* du Comité international (PV), figurent aussi en retrait, mais en caractères sans empattement maigres. Le texte principal fournit des notes historiques et des explications, mais ne fait pas partie intégrante des définitions.

Il est important de faire la distinction entre la définition d'une unité et la réalisation de cette définition. La définition de chaque unité de base du SI est rédigée avec soin de manière à ce qu'elle soit unique et qu'elle fournisse un fondement théorique solide permettant d'effectuer les mesures les plus exactes et les plus reproductibles. La réalisation de la définition d'une unité est la procédure selon laquelle la définition de l'unité peut être utilisée afin d'établir la valeur et l'incertitude associée d'une grandeur de même nature que l'unité. Une description de la façon dont les définitions de certaines unités importantes sont réalisées en pratique figure sur le site Web du BIPM, à l'adresse : www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix2/.

Les unités SI dérivées cohérentes sont définies de manière unique et seulement en fonction des unités de base du SI. Par exemple, l'unité cohérente dérivée SI de résistance, l'ohm, symbole Ω , est définie de manière unique par la relation $\Omega = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$, qui résulte de la définition de la grandeur résistance. Cependant, il est possible d'utiliser n'importe quelle méthode en accord avec les lois de la physique pour réaliser n'importe laquelle des unités SI. En pratique, l'unité ohm peut être réalisée avec une exactitude élevée au moyen de l'effet Hall quantique et de la valeur de la constante de von Klitzing recommandée par le Comité international (*voir* pp. 74 et 77 de l'annexe 1).

Enfin, il faut reconnaître que même si les sept grandeurs de base – longueur, masse, temps, courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse – sont considérées comme indépendantes par convention, les unités de base – le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela – ne le sont pas. Ainsi la définition du mètre fait appel à la seconde ; la définition de l'ampère fait appel au mètre, au kilogramme et à la seconde ; la définition de la mole fait appel au kilogramme ; et la définition de la candela fait appel au mètre, au kilogramme et à la seconde.

2.1.1.1 Unité de longueur (mètre)

La définition du mètre fondée sur le prototype international en platine iridié, en vigueur depuis 1889, avait été remplacée lors de la 11^e CGPM (1960) par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation de la définition du mètre. Cette réalisation était effectuée au moyen d'un interféromètre et d'un microscope mobile en translation utilisés pour mesurer la variation des trajets optiques par comptage de franges. La 17^e CGPM (1983, Résolution 1 ; CR, 97 et *Metrologia*, 1984, **20**, 25) a remplacé en 1983 cette définition par la définition actuelle :

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.

Le prototype international du mètre originel, qui fut approuvé par la 1^{re} CGPM en 1889 (CR, 34-38), est toujours conservé au BIPM dans les conditions fixées en 1889.

Le symbole c_0 (ou parfois simplement c) est le symbole conventionnel pour la vitesse de la lumière dans le vide.

2.1.1.2 Unité de masse (kilogramme)

Le prototype international du kilogramme, un objet fabriqué spécialement en platine iridié, est conservé au BIPM dans les conditions fixées par la 1^{re} CGPM en 1889 (CR, 34-38) lorsqu'elle approuva ce prototype et déclara :

Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.

La 3^e CGPM (1901 ; CR, 70), dans une déclaration tendant à faire cesser l'ambiguïté qui existait dans l'usage courant sur l'utilisation du terme « poids », confirma que :

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

La déclaration complète figure p. 53.

Il en résulte que la masse du prototype international du kilogramme est toujours égale à 1 kilogramme exactement, $m(\mathcal{K}) = 1$ kg. Cependant, en raison de l'accumulation inévitable de polluants sur les surfaces, le prototype international subit une contamination réversible de surface d'environ 1 µg par an en masse. C'est pourquoi le Comité international a déclaré que, jusqu'à plus ample information, la masse de référence du prototype international est celle qui suit immédiatement le nettoyage-lavage selon une méthode spécifique (PV, 1989, **57**, 15-16 et PV, 1990, **58**, 10-12). La masse de référence ainsi définie est utilisée pour étalonner les étalons nationaux en platine iridié (*Metrologia*, 1994, **31**, 317-336).

Le symbole $m(\mathcal{K})$ est utilisé pour désigner la masse du prototype international du kilogramme, $\mathcal{K}$.

2.1.1.3 Unité de temps (seconde)

La seconde, unité de temps, fut définie à l'origine comme la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen. La définition exacte du « jour solaire moyen » était laissée aux astronomes. Toutefois, les observations ont montré que cette définition n'était pas satisfaisante par suite des irrégularités de la rotation de la Terre. Pour donner plus de précision à la définition de l'unité de temps, la 11^e CGPM (1960, Résolution 9 ; CR, 86) approuva une définition, donnée par l'Union astronomique internationale, qui était fondée sur l'année tropique 1900. Cependant, les recherches expérimentales avaient déjà montré qu'un étalon atomique de temps, fondé sur une transition entre

deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule, pourrait être réalisé et reproduit avec une exactitude beaucoup plus élevée. Considérant qu'une définition de haute précision de l'unité de temps du Système international était indispensable pour la science et la technologie, la 13^e CGPM (1967/68, Résolution 1 ; CR, 103 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) a remplacé la définition de la seconde par la suivante :

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.

Le symbole $\nu(\text{hfs Cs})$ est utilisé pour désigner la fréquence de la transition hyperfine de l'atome de césium dans l'état fondamental.

Cette note a pour objet de préciser que la définition de la seconde du SI est fondée sur un atome de césium non perturbé par le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire dans un environnement maintenu à une température thermodynamique de 0 K. Les fréquences de tous les étalons primaires de fréquence doivent donc être corrigées pour tenir compte du décalage dû au rayonnement ambiant, comme l'a précisé le Comité consultatif du temps et des fréquences en 1999.

2.1.1.4 Unité de courant électrique (ampère)

Des unités électriques, dites « internationales », pour le courant et pour la résistance, avaient été introduites par le Congrès international d'électricité, tenu à Chicago en 1893, et les définitions de l'ampère « international » et de l'ohm « international » furent confirmées par la Conférence internationale de Londres en 1908.

Bien qu'une opinion unanime de remplacer ces unités « internationales » par des unités dites « absolues » fût déjà exprimée à l'occasion de la 8^e CGPM (1933), la décision officielle de supprimer ces unités « internationales » ne fut prise que par la 9^e CGPM (1948) qui adopta l'ampère comme unité de courant électrique, selon la définition suivante proposée par le Comité international (1946, Résolution 2 ; PV, 20, 129-137) :

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 2×10^{-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 $4\pi \times 10^{-7}$ henrys par mètre exactement, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

L'expression « unité MKS de force » qui figure dans le texte original de 1946 a été remplacée ici par « newton », nom adopté pour cette unité par la 9^e CGPM (1948, Résolution 7 ; CR, 70).

2.1.1.5 Unité de température thermodynamique (kelvin)

La définition de l'unité de température thermodynamique fut en fait donnée par la 10^e CGPM (1954, Résolution 3 ; CR, 79) qui choisit le point triple de l'eau comme point fixe fondamental en lui attribuant la température de 273,16 K par définition. La

13^e CGPM (1967/68, Résolution 3 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) adopta le nom *kelvin*, symbole K, au lieu de « degré Kelvin », symbole °K, et définit l'unité de température thermodynamique comme suit (1967/68, Résolution 4 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) :

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, $T_{\text{tpw}} = 273,16 \text{ K}$.

Lors de sa session de 2005 le Comité international a affirmé que :

Cette définition se réfère à une eau d'une composition isotopique définie par les rapports de quantité de matière suivants : 0,000 155 76 mole de ^2H par mole de ^1H , 0,000 379 9 mole de ^{17}O par mole de ^{16}O et 0,002 005 2 mole de ^{18}O par mole de ^{16}O .

Le symbole T_{tpw} est utilisé pour désigner la température thermodynamique du point triple de l'eau.

En raison de la manière dont les échelles de température étaient habituellement définies, il resta d'usage courant d'exprimer la température thermodynamique, symbole T , en fonction de sa différence par rapport à la température de référence $T_0 = 273,15 \text{ K}$, le point de congélation de l'eau. Cette différence de température est appelée température Celsius, symbole t , et elle est définie par l'équation entre grandeurs :

$$t = T - T_0.$$

L'unité de température Celsius est le degré Celsius, symbole °C, égal à l'unité kelvin par définition. Une différence ou un intervalle de température peut s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius (13^e CGPM, 1967/68, Résolution 3, mentionnée ci-dessus), la valeur numérique de la différence de température étant la même. Cependant, la valeur numérique de la température Celsius exprimée en degrés Celsius est liée à la valeur numérique de la température thermodynamique exprimée en kelvins par la relation :

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15.$$

Le kelvin et le degré Celsius sont aussi les unités de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) adoptée par le Comité international en 1989 dans sa Recommandation 5 (CI-1989 ; PV, 57, 26 et *Metrologia*, 1990, 27, 13).

2.1.1.6 Unité de quantité de matière (mole)

Après la découverte des lois fondamentales de la chimie, on a utilisé, pour spécifier les quantités des divers éléments et composés chimiques, des unités portant par exemple les noms de « atome-gramme » et « molécule-gramme ». Ces unités étaient liées directement aux « poids atomiques » et aux « poids moléculaires » qui étaient en réalité des masses relatives. Les « poids atomiques » furent d'abord rapportés à celui de l'élément chimique oxygène, pris par convention égal à 16. Mais, tandis que les physiciens séparaient les isotopes au spectromètre de masse et attribuaient la valeur 16 à l'un des isotopes de l'oxygène, les chimistes attribuaient la même valeur au mélange (de composition légèrement variable) des isotopes 16, 17 et 18 qui constitue l'élément oxygène naturel. Un accord entre l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) mit fin à cette dualité en 1959/60. Depuis lors, physiciens et chimistes sont convenus d'attribuer la valeur 12, exactement, au « poids atomique » de l'isotope 12 du carbone (carbone 12, ^{12}C), ou selon une formulation plus correcte à la masse atomique

relative $A_r(^{12}\text{C})$. L'échelle unifiée ainsi obtenue donne les valeurs des masses atomiques et moléculaires relatives, aussi connues sous le nom de poids atomiques et moléculaires, respectivement.

La grandeur utilisée par les chimistes pour spécifier la quantité d'éléments ou de composés chimiques est maintenant appelée « quantité de matière ». La quantité de matière est définie comme étant proportionnelle au nombre d'entités élémentaires d'un échantillon, la constante de proportionnalité étant une constante universelle identique pour tous les échantillons. L'unité de quantité de matière est appelée la *mole*, symbole mol, et la mole est définie en fixant la masse de carbone 12 qui constitue une mole d'atomes de carbone 12. Par un accord international, cette masse a été fixée à 0,012 kg, c'est-à-dire 12 g.

Suivant les propositions de l'UIPPA, de l'UICPA et de l'ISO, le Comité international donna en 1967 et confirma en 1969 une définition de la mole qui fut finalement adoptée par la 14^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, 8, 36) :

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 ; son symbole est « mol ».**
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 est égale à 0,012 kilogramme par mole exactement, $M(^{12}\text{C}) = 12 \text{ g/mol}$.

En 1980, le Comité international a approuvé le rapport du CCU (1980) qui précisait :

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.

La définition de la mole permet aussi de déterminer la valeur de la constante universelle qui relie le nombre d'entités à la quantité de matière d'un échantillon. Cette constante est appelée constante d'Avogadro, symbole N_A ou L . Si $N(X)$ désigne le nombre d'entités X d'un échantillon donné, et si $n(X)$ désigne la quantité de matière d'entités X du même échantillon, on obtient la relation :

$$n(X) = N(X)/N_A.$$

Notons que puisque $N(X)$ est sans dimension, et puisque $n(X)$ est exprimé par l'unité SI mole, la constante d'Avogadro a pour unité SI la mole à la puissance moins un.

Dans le nom « quantité de matière », les mots « de matière » pourraient être simplement remplacés par d'autres mots précisant la matière en question pour chaque application particulière, ainsi par exemple on pourrait parler de « quantité de chlorure d'hydrogène, HCl » ou de « quantité de benzène, C_6H_6 ». Il est important de toujours préciser l'entité en question (comme le souligne la seconde phrase de la définition de la mole), de préférence en donnant la formule chimique empirique du matériau concerné. Bien que le mot « quantité » ait une définition plus générale dans le dictionnaire, cette abréviation du nom complet « quantité de matière » est parfois utilisée par souci de concision. Ceci s'applique aussi aux grandeurs dérivées telles que la « concentration de quantité de matière », qui peut simplement être appelée « concentration de quantité ». Toutefois, dans le domaine de la chimie clinique, le nom « concentration de quantité de matière » est généralement abrégé en « concentration de matière ».

Le symbole recommandé pour la masse atomique relative (poids atomique) est $A_r(X)$, dont il faut préciser l'entité atomique X, et le symbole recommandé pour la masse moléculaire relative (poids moléculaire) est $M_r(X)$, dont il faut préciser l'entité moléculaire X.

La masse molaire d'un atome ou d'une molécule X est désignée par $M(X)$ ou M_X ; c'est la masse d'une mole de X.

Lorsque l'on cite la définition de la mole, il convient de lui adjoindre aussi cette remarque.

2.1.1.7 Unité d'intensité lumineuse (candela)

Les unités d'intensité lumineuse fondées sur des étalons à flamme ou à filament incandescent, qui étaient en usage dans différents pays avant 1948, furent d'abord remplacées par la « bougie nouvelle » fondée sur la luminance du radiateur de Planck (corps noir) à la température de congélation du platine. Cette modification avait été préparée dès avant 1937 par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) et par le Comité international ; la décision fut prise par le Comité international en 1946. Elle fut ratifiée en 1948 par la 9^e CGPM qui adopta pour cette unité un nouveau nom international, la *candela*, symbole *cd* ; en 1967, la 13^e CGPM (Résolution 5 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) donna une forme modifiée à la définition de 1946.

En 1979, en raison des difficultés expérimentales liées à la réalisation du radiateur de Planck aux températures élevées et des possibilités nouvelles offertes par la radiométrie, c'est-à-dire la mesure de la puissance des rayonnements optiques, la 16^e CGPM (1979, Résolution 3 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, **16**, 56) adopta une nouvelle définition de la candela :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{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 540×10^{12} hertz est égale à 683 lumens par watt exactement, $K = 683 \text{ lm/W} = 683 \text{ cd sr/W}$.

2.1.2 Symboles des sept unités de base

Les unités de base du Système international sont rassemblées dans le tableau 1 qui relie les grandeurs de base aux noms et symboles des sept unités de base (10^e CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) ; 11^e CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) ; 13^e CGPM (1967/68, Résolution 3 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) ; 14^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36)).

Tableau 1. Unités de base du SI

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

Les symboles indiqués pour les grandeurs sont généralement de simples lettres de l'alphabet grec ou latin, en italique, et constituent des recommandations. L'utilisation des symboles indiqués pour les unités est obligatoire, voir chapitre 5.

2.2 Unités SI dérivées

Les unités dérivées sont formées à partir de produits de puissances des unités de base. Les unités dérivées cohérentes sont des produits de puissances des unités de base qui ne font pas intervenir d'autre facteur numérique que 1. Les unités de base et les unités dérivées cohérentes du SI forment un ensemble cohérent, désigné sous le nom d'ensemble d'*unités SI cohérentes* (voir 1.4, p. 16).

2.2.1 Unités dérivées exprimées à partir des unités de base

Les grandeurs utilisées dans le domaine scientifique sont en nombre illimité ; il n'est donc pas possible de fournir une liste complète des grandeurs et unités dérivées. Le tableau 2 présente un certain nombre d'exemples de grandeurs dérivées, avec les unités dérivées cohérentes correspondantes exprimées directement en fonction des unités de base.

Tableau 2. Exemples d'unités SI dérivées cohérentes exprimées à partir des unités de base

Grandeur dérivée		Unité SI dérivée cohérente	
Nom	Symbole	Nom	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	ρ	kilogramme par mètre cube	kg/m^3
masse surfacique	ρ_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
de quantité de matière ^(a) , concentration			
concentration massique	ρ, γ	kilogramme par mètre cube	kg/m^3
luminance lumineuse	L_v	candela par mètre carré	cd/m^2
indice de réfraction ^(b)	n	un	1
perméabilité relative ^(b)	μ_r	un	1

(a) Dans le domaine de la chimie clinique, cette grandeur est aussi appelée concentration de matière.

(b) Ce sont des grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un. Le symbole « 1 » pour l'unité (le nombre « un ») n'est généralement pas mentionné lorsque l'on précise la valeur des grandeurs sans dimension.

2.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités faisant appel à des noms spéciaux et des symboles particuliers

Par souci de commodité, certaines unités dérivées cohérentes ont reçu un nom spécial et un symbole particulier. Elles sont au nombre de vingt-deux et sont mentionnées au tableau 3. Ces noms spéciaux et ces symboles particuliers peuvent eux-mêmes être utilisés avec les noms et les symboles d'autres unités de base ou dérivées pour exprimer les unités d'autres grandeurs dérivées. Quelques exemples figurent au tableau 4. Les noms spéciaux et les symboles particuliers permettent d'exprimer, sous

une forme condensée, des combinaisons d'unités de base fréquemment utilisées, mais souvent ils servent aussi à rappeler au lecteur la nature de la grandeur concernée. Les préfixes SI peuvent être utilisés avec n'importe quel nom spécial et symbole particulier, mais dans ce cas l'unité qui en résulte n'est plus une unité cohérente.

Les quatre derniers noms et symboles d'unités figurant au bas du tableau 3 sont particuliers : ils furent spécifiquement approuvés par la 15^e CGPM (1975, Résolutions 8 et 9 ; CR, 105 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180), la 16^e CGPM (1979, Résolution 5 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, **16**, 56) et la 21^e CGPM (1999, Résolution 12 ; CR, 145 et *Metrologia*, 2000, **37**, 95) pour éviter des erreurs dans les mesures liées à la santé humaine.

Dans la dernière colonne des tableaux 3 et 4, on trouve l'expression des unités SI mentionnées en fonction des unités SI de base. Dans cette colonne, les facteurs tels que m^0 , kg^0 , etc., considérés comme égaux à 1, ne sont pas écrits explicitement.

Tableau 3. Unités SI dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Grandeur dérivée	Nom	Symbole	Unité SI dérivée cohérente ^(a)	
			Expression utilisant d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
angle plan	radian ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
angle solide	stéradian ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
fréquence	hertz ^(d)	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 force électromotrice	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	Ω	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 ^(e)	°C		K
flux lumineux	lumen	lm	cd sr ^(c)	cd
éclairage lumineux	lux	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
activité d'un radionucléide ^(f)	becquerel ^(d)	Bq		s ⁻¹
dose absorbée, énergie massique (communiquée), kerma	gray	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
équivalent de dose, équivalent de dose ambiant, équivalent de dose directionnel, équivalent de dose individuel,	sievert ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
activité catalytique	katal	kat		s ⁻¹ mol

- (a) Les préfixes SI peuvent être utilisés avec n'importe quel nom spécial et symbole particulier, mais dans ce cas l'unité qui en résulte n'est plus une unité cohérente.
- (b) Le radian et le stéradian sont des noms spéciaux pour le nombre un, qui peuvent être utilisés pour donner des informations sur la grandeur concernée. En pratique, les symboles rad et sr sont utilisés lorsque c'est utile, et le symbole pour l'unité dérivée « un » n'est généralement pas mentionné lorsque l'on donne les valeurs des grandeurs sans dimension.
- (c) En photométrie, on maintient généralement le nom et le symbole du stéradian, sr, dans l'expression des unités.
- (d) Le hertz est uniquement utilisé pour les phénomènes périodiques, et le becquerel pour les processus aléatoires liés à la mesure de l'activité d'un radionucléide.
- (e) Le degré Celsius est le nom spécial du kelvin utilisé pour exprimer les températures Celsius. Le degré Celsius et le kelvin ont la même taille, ainsi la valeur numérique d'une différence de température ou d'un intervalle de température est identique quand elle est exprimée en degrés Celsius ou en kelvins.
- (f) L'activité d'un radionucléide est parfois appelée de manière incorrecte radioactivité.
- (g) Voir la Recommandation 2 (CI-2002) du CIPM (p. 79) sur l'utilisation du sievert (PV, 2002, 70, 102).

Tableau 4. Exemples d'unités SI dérivées cohérentes dont le nom et le symbole comprennent des unités SI dérivées cohérentes ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Grandeur dérivée	Unité SI dérivée cohérente		
	Nom	Symbole	Expression en unités SI de base
viscosité dynamique	pascal seconde	Pa s	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-1}$
moment d'une force	newton mètre	N m	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$
tension superficielle	newton par mètre	N/m	kg s^{-2}
vitesse angulaire	radian par seconde	rad/s	$\text{m m}^{-1} \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad/s ²	$\text{m m}^{-1} \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
flux thermique surfacique, éclairage énergétique	watt par mètre carré	W/m ²	kg s^{-3}
capacité thermique, entropie	joule par kelvin	J/K	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$
capacité thermique massique, entropie massique	joule par kilogramme kelvin	J/(kg K)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
énergie massique	joule par kilogramme	J/kg	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
conductivité thermique	watt par mètre kelvin	W/(m K)	$\text{m kg s}^{-3} \text{K}^{-1}$
énergie volumique	joule par mètre cube	J/m ³	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$
champ électrique	volt par mètre	V/m	$\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$
charge électrique volumique	coulomb par mètre cube	C/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s A}$
charge électrique surfacique	coulomb par mètre carré	C/m ²	$\text{m}^{-2} \text{s A}$
induction électrique, déplacement électrique	coulomb par mètre carré	C/m ²	$\text{m}^{-2} \text{s A}$
permittivité	farad par mètre	F/m	$\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$
perméabilité	henry par mètre	H/m	$\text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$
énergie molaire	joule par mole	J/mol	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{mol}^{-1}$
entropie molaire, capacité thermique molaire	joule par mole kelvin	J/(mol K)	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$
exposition (rayons x et γ)	coulomb par kilogramme	C/kg	$\text{kg}^{-1} \text{s A}$
débit de dose absorbée	gray par seconde	Gy/s	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
intensité énergétique	watt par stéradian	W/sr	$\text{m}^4 \text{m}^{-2} \text{kg s}^{-3} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
luminance énergétique	watt par mètre carré stéradian	W/(m ² sr)	$\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{kg s}^{-3} = \text{kg s}^{-3}$
concentration de l'activité catalytique	katal par mètre cube	kat/m ³	$\text{m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{mol}$

Les valeurs de plusieurs grandeurs différentes peuvent être exprimées au moyen du même nom et symbole d'unité SI. Ainsi le joule par kelvin est le nom de l'unité SI pour la grandeur capacité thermique aussi bien que pour la grandeur entropie. De même, l'ampère est le nom de l'unité SI pour la grandeur de base courant électrique aussi bien que pour la grandeur dérivée force magnétomotrice. 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).

Une unité dérivée peut souvent s'exprimer de plusieurs façons en utilisant des unités de base et des unités dérivées ayant des noms spéciaux : le joule, par exemple, peut s'écrire newton mètre, ou bien kilogramme mètre carré par seconde carrée. Cette liberté algébrique est toutefois limitée par des considérations physiques de bon sens, et selon les circonstances certaines formes peuvent être plus utiles que d'autres.

En pratique, afin de réduire le risque de confusion entre des grandeurs différentes ayant la même dimension, on exprime leur unité en employant de préférence un nom spécial ou une combinaison particulière de noms d'unités, rappelant comment la grandeur est définie. Par exemple, la grandeur « couple » peut être considérée comme résultant du produit vectoriel d'une force par une distance, ce qui suggère d'utiliser l'unité newton mètre, ou comme représentant une énergie par unité d'angle, ce qui suggère d'utiliser l'unité joule par radian. On appelle l'unité SI de fréquence hertz (un cycle par seconde), l'unité SI de vitesse angulaire radian par seconde et l'unité SI d'activité becquerel (une occurrence par seconde). Même s'il est correct d'écrire ces trois unités seconde à la puissance moins un, l'emploi de noms différents sert à souligner la différence de nature des grandeurs en question. Le fait d'utiliser l'unité radian par seconde pour exprimer la vitesse angulaire, et le hertz pour la fréquence, indique aussi que la valeur numérique de la fréquence en hertz doit être multipliée par 2π pour obtenir la valeur numérique de la vitesse angulaire correspondante en radian par seconde.

Dans le domaine des rayonnements ionisants, on appelle l'unité SI d'activité le becquerel plutôt que seconde à la puissance moins un, et les unités SI de dose absorbée et d'équivalent de dose, respectivement, gray et sievert, plutôt que joule par kilogramme. Les noms spéciaux becquerel, gray et sievert ont été introduits spécialement en raison des dangers pour la santé humaine qui pourraient résulter d'erreurs dans le cas où les unités seconde à la puissance moins un et joule par kilogramme seraient à tort utilisées pour identifier les grandeurs.

Le CIPM, reconnaissant l'importance particulière des unités dans le domaine de la santé, a adopté un texte détaillé sur le sievert dans la 5^e édition de la brochure sur le SI, Recommandation 1 (CI-1984), adoptée par le CIPM (PV, 1984, **52**, 31 et *Metrologia*, 1985, **21**, 90), et Recommandation 2 (CI-2002), adoptée par le CIPM (PV, 2002, **70**, 102), voir pp. 72 et 79, respectivement.

2.2.3 Unités des grandeurs sans dimension, aussi désignées grandeurs de dimension un

Certaines grandeurs sont définies par le rapport de deux grandeurs de même nature ; elles sont donc sans dimension, ou leur dimension peut être exprimée par le nombre un. L'unité SI cohérente de toutes les grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un, est le nombre un, parce que l'unité est le rapport de deux unités SI identiques. La valeur de ces grandeurs est exprimée par des nombres, et l'unité « un » n'est pas mentionnée explicitement. On peut citer, comme exemple de telles grandeurs, l'indice de réfraction, la perméabilité relative ou le coefficient de frottement. D'autres grandeurs sont définies comme un produit assez complexe et sans dimension de grandeurs habituelles. Par exemple, parmi les « nombres

caractéristiques » citons le nombre de Reynolds $Re = \rho v l / \eta$, où ρ est la masse volumique, η la viscosité dynamique, v la vitesse et l la longueur. Dans tous ces cas, l'unité peut être considérée comme étant le nombre un, unité dérivée sans dimension.

Une autre classe de grandeurs sans dimension est celle des nombres qui servent à indiquer un comptage, comme le nombre de molécules, la dégénérescence (nombre de niveaux d'énergie) ou la fonction de partition en thermodynamique statistique (nombre d'états thermiques accessibles). Toutes ces grandeurs de comptage sont décrites comme étant sans dimension, ou de dimension un, et ont pour unité l'unité SI un, même si l'unité des grandeurs de comptage ne peut pas être décrite comme une unité dérivée exprimée en unités de base du SI. Pour ces grandeurs, l'unité un pourrait être considérée comme une autre unité de base.

Dans quelques cas, cependant, cette unité se voit attribuer un nom spécial, en vue de faciliter l'identification de la grandeur concernée. C'est le cas du radian et du stéradian. Le radian et le stéradian ont reçu de la CGPM un nom spécial pour l'unité dérivée cohérente un, afin d'exprimer les valeurs de l'angle plan et de l'angle solide, respectivement, et figurent donc au tableau 3.

3 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI

3.1 Préfixes SI

La 11^e CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) a adopté une série de noms de préfixes et symboles de préfixes pour former les noms et symboles des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI de 10^{12} à 10^{-12} . Les préfixes pour 10^{-15} et 10^{-18} furent ajoutés par la 12^e CGPM (1964, Résolution 8 ; CR, 94), ceux pour 10^{15} et 10^{18} par la 15^e CGPM (1975, Résolution 10 ; CR, 106 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180-181) et ceux pour 10^{21} , 10^{24} , 10^{-21} et 10^{-24} par la 19^e CGPM (1991, Résolution 4 ; CR, 97 et *Metrologia*, 1992, **29**, 3). Les préfixes et symboles de préfixes qui ont été adoptés figurent au tableau 5.

Tableau 5. Préfixes SI

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

Les préfixes SI représentent strictement des puissances de 10. Ils ne doivent pas être utilisés pour exprimer des puissances de 2 (par exemple, un kilobit représente 1000 bits et non 1024 bits). Les préfixes adoptés par la CEI pour les puissances binaires sont publiés dans la norme internationale CEI 60027-2 : 2005, 3^e édition, *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique – Partie 2 : Télécommunications et électronique*. Les noms et symboles des préfixes correspondant à 2^{10} , 2^{20} , 2^{30} , 2^{40} , 2^{50} , et 2^{60} sont, respectivement : kibi, Ki ; mébi, Mi ; gibi, Gi ; tébi, Ti ; pébi, Pi ; et exbi, Ei. Ainsi, par exemple, un kibioctet s'écrit : 1 KiB = 2^{10} B = 1024 B, où B désigne l'octet. Bien que ces préfixes n'appartiennent pas au SI, ils doivent être utilisés en informatique afin d'éviter un usage incorrect des préfixes SI.

Les symboles des préfixes sont écrits en romain, comme les symboles d'unités, quelle que soit la police employée par ailleurs. Ils sont attachés aux symboles d'unités, sans espace entre le symbole du préfixe et celui de l'unité. À l'exception de da (déca), h (hecto), et k (kilo), tous les symboles des préfixes des multiples sont en majuscules, et tous les symboles des préfixes des sous-multiples sont en minuscules. Tous les noms de préfixes sont en minuscules, sauf en début de phrase.

Le groupe formé d'un symbole de préfixe et d'un symbole d'unité constitue un nouveau symbole d'unité inséparable (formant un multiple ou sous-multiple de l'unité en question) qui peut être élevé à une puissance positive ou négative, et qui peut être combiné à d'autres symboles d'unités pour former des symboles d'unités composés.

Exemples:

$$2,3 \text{ cm}^3 = 2,3 (\text{cm})^3 = 2,3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2,3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ cm}^{-1} = 1 (\text{cm})^{-1} = 1 (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} = 100 \text{ m}^{-1}$$

$$1 \text{ V/cm} = (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m} = 100 \text{ V/m}$$

$$5000 \mu\text{s}^{-1} = 5000 (\mu\text{s})^{-1} = 5000 (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$$

Exemples d'utilisation de préfixes :

- pm (picomètre)
- mmol (millimole)
- G Ω (gigaohm)
- THz (térahertz)

De même, les noms de préfixes ne sont pas séparés des noms d'unités auxquels ils sont attachés. Ainsi, par exemple, millimètre, micropascal, et méganewton s'écrivent en un seul mot.

Les symboles de préfixes composés, c'est-à-dire les symboles de préfixes formés par juxtaposition de deux ou plusieurs symboles de préfixes, sont interdits. Cette règle s'applique aussi aux noms de préfixes composés.

nm (nanomètre)
mais pas
mµm (millimicromètre)

Les symboles de préfixes ne peuvent pas être utilisés seuls ou attachés au nombre 1, le symbole de l'unité un. De même, les noms de préfixes ne peuvent pas être attachés au nom de l'unité un, c'est-à-dire au mot un.

Le nombre d'atomes de plomb dans l'échantillon est égal à $N(\text{Pb}) = 5 \times 10^6$,
mais pas $N(\text{Pb}) = 5 \text{ M}$,
où M représenterait le préfixe méga.

Les noms et symboles de préfixes sont utilisés avec un certain nombre d'unités en dehors du SI (*voir* chapitre 5), mais ils ne sont jamais utilisés avec les unités de temps : minute, min ; heure, h ; jour, d. Les astronomes utilisent toutefois la milliseconde d'arc (ou de degré), symbole mas, et la microseconde d'arc, symbole µas, comme unité de mesure des très petits angles.

3.2 Le kilogramme

Parmi les unités de base du Système international, l'unité de masse est la seule dont le nom, pour des raisons historiques, contienne un préfixe. 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 » (CIPM, 1967, Recommandation 2 ; PV, 35, 29 et *Metrologia*, 1968, 4, 45).

$10^{-6} \text{ kg} = 1 \text{ mg}$,
mais pas
 1 µkg (microkilogramme).

4 Unités en dehors du SI

Le Système international d'unités, SI, est un système d'unités, adopté par la Conférence générale, qui fournit les unités de référence approuvées au niveau international en fonction desquelles toutes les autres unités sont définies. L'usage du SI est recommandé dans les sciences, la technologie, les sciences de l'ingénieur et le commerce. Les unités de base du SI et les unités SI dérivées cohérentes, y compris celles ayant des noms spéciaux, ont l'avantage considérable de former un ensemble cohérent. En conséquence, il n'est pas nécessaire d'effectuer des conversions d'unités quand on affecte des valeurs particulières aux grandeurs dans les équations aux grandeurs. Parce que le SI est le seul système d'unités reconnu au niveau mondial, il a l'avantage manifeste d'établir un langage universel. Enfin, si tous utilisent ce système, il simplifiera l'enseignement des sciences et de la technologie à la prochaine génération.

Il est néanmoins reconnu que certaines unités en dehors du SI sont encore utilisées dans les publications scientifiques, techniques et commerciales, et qu'elles continueront à l'être encore pendant de nombreuses années. Certaines unités en dehors du SI sont importantes, d'un point de vue historique, dans la littérature traditionnelle. D'autres unités en dehors du SI, comme les unités de temps et d'angle, sont tellement ancrées dans l'histoire et la culture humaine qu'elles continueront à être utilisées dans un avenir prévisible. D'autre part, les scientifiques doivent avoir la liberté d'utiliser parfois des unités en dehors du SI, s'ils y trouvent un avantage particulier dans leur travail. Citons par exemple l'utilisation des unités CGS de Gauss pour la théorie de l'électromagnétisme appliquée à l'électrodynamique quantique et à la relativité. C'est pourquoi il est utile d'établir une liste des unités en dehors du SI les plus importantes, ce qui est fait dans les tableaux ci-dessous. Cependant, lorsqu'on utilise ces unités, il faut bien comprendre que l'on perd les avantages du SI.

L'inclusion d'unités en dehors du SI dans ce texte n'implique pas que leur usage est encouragé. Pour les raisons que nous avons déjà invoquées, l'usage des unités SI est en général préférable. Il est aussi souhaitable d'éviter d'utiliser conjointement des unités en dehors du SI et des unités SI ; en particulier, la combinaison d'unités en dehors du SI et d'unités SI pour former des unités composées doit être restreinte à des cas particuliers afin de ne pas compromettre les avantages du SI. Enfin, il est de bon usage de définir les unités en dehors du SI figurant aux tableaux 7, 8 et 9, en fonction des unités SI correspondantes.

4.1 Unités en dehors du SI en usage avec le SI et unités fondées sur des constantes fondamentales

Le Comité international a révisé en 2004 la classification des unités en dehors du SI publiée dans la 7^e édition de la brochure sur le SI. Le tableau 6 donne une liste des unités en dehors du SI dont l'usage avec le Système international est accepté par le CIPM, parce qu'elles sont largement utilisées dans la vie quotidienne. Leur utilisation

pourrait se poursuivre indéfiniment, et chacune de ces unités a une définition exacte en unités SI. Les tableaux 7, 8 et 9 contiennent des unités utilisées uniquement dans des circonstances particulières. Les unités du tableau 7 sont liées à des constantes fondamentales et leur valeur doit être déterminée de manière expérimentale. Les tableaux 8 et 9 contiennent des unités qui ont une valeur définie quand elles sont exprimées en unités SI, et qui sont utilisées dans des circonstances particulières afin de satisfaire aux besoins dans les domaines commerciaux et légaux, ou à des intérêts scientifiques particuliers. Il est probable que ces unités continueront à être utilisées encore pendant de nombreuses années. Beaucoup de ces unités sont importantes pour l'interprétation des anciens textes scientifiques. Les tableaux 6, 7, 8 et 9 sont présentés ci-dessous.

Le tableau 6 contient les unités traditionnelles de temps et d'angle. Il contient aussi l'hectare, le litre et la tonne, qui sont tous d'usage courant au niveau mondial, et qui diffèrent des unités SI cohérentes correspondantes d'un facteur égal à une puissance entière de dix. Les préfixes SI sont utilisés avec plusieurs de ces unités, mais pas avec les unités de temps.

Tableau 6. Unités en dehors du SI dont l'usage est accepté avec le SI

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Valeur en unités SI
temps	minute	min	1 min = 60 s
	heure ^(a)	h	1 h = 60 min = 3600 s
	jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
angle plan	degré ^(b, c)	°	1° = ($\pi/180$) rad
	minute	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10\,800$) rad
	seconde ^(d)	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648\,000$) rad
superficie	hectare ^(e)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
volume	litre ^(f)	L, l	1 L = 1 l = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
masse	tonne ^(g)	t	1 t = 10 ³ kg

(a) Le symbole de cette unité figure dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948 ; CR, 70).

(b) La norme ISO 31 recommande que le degré soit subdivisé de manière décimale plutôt qu'en utilisant la minute et la seconde. Pour la navigation et la topographie, toutefois, l'avantage d'utiliser la minute tient au fait qu'une minute de latitude à la surface de la Terre correspond (approximativement) à un mille marin.

(c) Le gon, parfois appelé grade, est une autre unité d'angle plan définie comme étant égale à ($\pi/200$) rad. Un angle droit comporte donc 100 gons ou 100 grades. Le gon ou le grade peuvent être utiles dans le domaine de la navigation parce que la distance entre le pôle et l'Équateur à la surface de la Terre est égale environ à 10 000 km, 1 km à la surface de la Terre sous-tend donc un angle d'un centigon ou d'un centigrade au centre de la Terre. Le gon et le grade sont toutefois très rarement utilisés.

(d) En astronomie, les petits angles sont mesurés en seconde d'arc (c'est-à-dire en secondes d'angle plan), en milli-, micro- ou picosecondes d'arc (symbole as ou ", mas, μ as et pas, respectivement). L'arcseconde ou la seconde de degré sont d'autres noms pour la seconde d'angle plan.

(e) L'unité hectare et son symbole ha furent adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41). L'hectare est utilisé pour exprimer des superficies agraires.

(f) Le litre et son symbole l (en minuscule) furent adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41). Le symbole L (en capitale) fut adopté par la 16^e Conférence générale (1979, Résolution 6 ; CR, 101 et *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57), comme alternative pour éviter le risque de confusion entre la lettre l et le chiffre un, 1.

(g) La tonne et son symbole t furent adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41). Dans les pays de langue anglaise, cette unité est généralement désignée sous le nom « tonne métrique ».

Le tableau 7 contient des unités dont les valeurs en unités SI ne peuvent être connues que par détermination expérimentale, avec une incertitude associée. À l'exception de l'unité astronomique, toutes les unités du tableau 7 sont liées à des constantes fondamentales de la physique. Le Comité international a accepté l'usage avec le SI des trois premières unités de ce tableau : les unités en dehors du SI électronvolt (symbole eV), dalton (symbole Da) ou unité de masse atomique unifiée (symbole u), et l'unité astronomique (symbole ua). Les unités du tableau 7 jouent un rôle important dans un certain nombre de domaines spécialisés, dont les résultats de mesure et les calculs sont plus commodément et utilement exprimés au moyen de ces unités. Pour l'électronvolt et le dalton, les valeurs dépendent de la charge électrique élémentaire e et de la constante d'Avogadro N_A , respectivement.

Il existe de nombreuses autres unités de cette nature, car il y a de nombreux domaines dans lesquels il est plus commode d'exprimer les résultats d'observations expérimentales ou de calculs théoriques au moyen des constantes fondamentales de la nature. Les deux systèmes d'unités les plus importants fondés sur des constantes fondamentales sont le système d'unités naturelles (u.n.) utilisé dans le domaine de la physique des hautes énergies et des particules, et le système d'unités atomiques (u.a.) utilisé en physique atomique et en chimie quantique. Dans le système d'unités naturelles, les grandeurs de base en mécanique sont la vitesse, l'action et la masse, dont les unités de base sont la vitesse de la lumière dans le vide c_0 , la constante de Planck h divisée par 2π , appelée constante de Planck réduite avec le symbole $\hbar$, et la masse de l'électron m_e , respectivement. En général ces unités n'ont pas reçu de nom spécial ou de symbole particulier, mais sont simplement appelées unité naturelle de vitesse, symbole c_0 , unité naturelle d'action, symbole $\hbar$, et unité naturelle de masse, symbole m_e . Dans ce système, le temps est une grandeur dérivée et l'unité naturelle de temps est une unité dérivée égale à la combinaison d'unités de base $\hbar/m_e c_0^2$. De même dans le système d'unités atomiques, n'importe quel ensemble de quatre des cinq grandeurs charge, masse, action, longueur et énergie est considéré comme un ensemble de grandeurs de base. Les unités de base sont e pour la charge électrique élémentaire, m_e pour la masse de l'électron, $\hbar$ pour l'action, a_0 (ou bohr) pour le rayon de Bohr, et E_h (ou hartree) pour l'énergie de Hartree, respectivement. Dans ce système, le temps est aussi une grandeur dérivée et l'unité atomique de temps est une unité dérivée, égale à $\hbar/E_h$. Notons que $a_0 = (\alpha/4\pi R_\infty)$, où α est la constante de structure fine et R_∞ est la constante de Rydberg, et que $E_h = e^2/(4\pi\epsilon_0 a_0) = 2R_\infty h c_0 = \alpha^2 m_e c_0^2$, où ϵ_0 est la constante électrique (la permittivité du vide) ; ϵ_0 a une valeur exacte dans le SI.

Pour information, ces dix unités naturelles et atomiques et leur valeur en unité SI figurent au tableau 7. Parce que les systèmes de grandeurs sur lesquelles ces unités sont fondées diffèrent vraiment de manière fondamentale de celles du SI, elles ne sont généralement pas utilisées avec le SI, et le Comité international n'a pas officiellement approuvé leur usage avec le Système international. Pour une bonne compréhension, le résultat final d'une mesure ou d'un calcul exprimé en unités naturelles ou atomiques doit aussi toujours être exprimé dans l'unité SI correspondante. Les unités naturelles et les unités atomiques sont utilisées uniquement dans les domaines particuliers de la physique des particules, de la physique atomique et de la chimie quantique. Les incertitudes-type sur les derniers chiffres significatifs figurent entre parenthèses après chaque valeur numérique.

Tableau 7. Unités en dehors du SI dont la valeur en unités SI est obtenue expérimentalement

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Valeur en unités SI ^(a)
Unités en usage avec le SI			
énergie	électronvolt ^(b)	eV	1 eV = 1,602 176 53 (14) × 10 ⁻¹⁹ J
masse	dalton, ^(c)	Da	1 Da = 1,660 538 86 (28) × 10 ⁻²⁷ kg
	unité de masse atomique unifiée	u	1 u = 1 Da
longueur	unité astronomique ^(d)	ua	1 ua = 1,495 978 706 91 (6) × 10 ¹¹ m
Unités naturelles			
vitesse	unité naturelle de vitesse (vitesse de la lumière dans le vide)	c_0	299 792 458 m/s (exactement)
action	unité naturelle d'action (constante de Planck réduite)	$\hbar$	1,054 571 68 (18) × 10 ⁻³⁴ J s
masse	unité naturelle de masse (masse de l'électron)	m_e	9,109 3826 (16) × 10 ⁻³¹ kg
temps	unité naturelle de temps	$\hbar/m_e c_0^2$	1,288 088 6677 (86) × 10 ⁻²¹ s
Unités atomiques			
charge	unité atomique de charge (charge électrique élémentaire)	e	1,602 176 53 (14) × 10 ⁻¹⁹ C
masse	unité atomique de masse (masse de l'électron)	m_e	9,109 3826 (16) × 10 ⁻³¹ kg
action	unité atomique d'action (constante de Planck réduite)	$\hbar$	1,054 571 68 (18) × 10 ⁻³⁴ J s
longueur	unité atomique de longueur bohr (rayon de Bohr)	a_0	0,529 177 2108 (18) × 10 ⁻¹⁰ m
énergie	unité atomique d'énergie, hartree (énergie de Hartree)	E_h	4,359 744 17 (75) × 10 ⁻¹⁸ J
temps	unité atomique de temps	$\hbar/E_h$	2,418 884 326 505 (16) × 10 ⁻¹⁷ s

(a) Les valeurs en unités SI de toutes les unités de ce tableau, à l'exception de l'unité astronomique, proviennent de la liste des valeurs des constantes fondamentales recommandées par CODATA en 2002, publiée par P.J. Mohr et B.N. Taylor, *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**, 1-107. L'incertitude-type sur les deux derniers chiffres est donnée entre parenthèses (voir 5.3.5, p. 45).

(b) L'électronvolt est l'énergie cinétique acquise par un électron après traversée d'une différence de potentiel de 1 V dans le vide. L'électronvolt est souvent combiné aux préfixes SI.

(c) Le dalton (Da) et l'unité de masse atomique unifiée (u) sont d'autres noms (et symboles) pour la même unité, égale à 1/12 de la masse de l'atome de ¹²C libre, au repos et dans son état fondamental. Le dalton est souvent combiné à des préfixes SI, par exemple pour exprimer la masse de grosses molécules en kilodaltons, kDa, ou mégadaltons, MDa, et pour exprimer la valeur de petites différences de masse d'atomes ou de molécules en nanodaltons, nDa, voire picodaltons, pDa.

(d) L'unité astronomique est égale approximativement à la distance moyenne entre le Soleil et la Terre. C'est le rayon d'une orbite newtonienne circulaire non perturbée autour du Soleil d'une particule de masse infinitésimale, se déplaçant à une vitesse moyenne de 0,017 202 098 95 radians par jour (encore appelée constante de Gauss). La valeur de l'unité astronomique est donnée dans l'IERS Conventions 2003 (D.D. McCarthy et G. Petit eds., *IERS Technical Note* 32, Frankfurt am Main : Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004, 12). La valeur de l'unité astronomique en mètres provient des JPL ephemerides DE403 (Standish E.M., Report of the IAU WGAS Sub-Group on Numerical Standards, *Highlights of Astronomy*, Appenzeller ed., Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1995, 180-184).

Les tableaux 8 et 9 contiennent des unités en dehors du SI utilisées afin de répondre aux besoins spécifiques de certains groupes, pour différentes raisons. Bien qu'il soit préférable d'utiliser les unités SI pour les raisons déjà invoquées précédemment, les auteurs qui voient un avantage particulier à utiliser ces unités en dehors du SI doivent être libres de le faire s'ils les considèrent mieux appropriées à leurs besoins. Puisque, toutefois, les unités SI sont le fondement international d'après lequel toutes les autres unités sont définies, ceux qui utilisent les unités des tableaux 8 et 9 doivent toujours mentionner leur définition en unités SI.

Le tableau 8 mentionne aussi les unités des grandeurs logarithmiques, le néper, le bel et le décibel. Ce sont des unités sans dimension, d'une nature quelque peu différente des autres unités sans dimension, et certains scientifiques considèrent que l'on ne devrait même pas les appeler unités. Elles sont utilisées pour véhiculer des informations sur la nature logarithmique de rapports de grandeurs. Le néper, Np, est utilisé pour exprimer la valeur de logarithmes néperiens (ou naturels) de rapports de grandeurs, $\ln = \log_e$. Le bel et le décibel, B et dB, $1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B}$, sont utilisés pour exprimer la valeur de logarithmes de base 10 de rapports de grandeurs, $\lg = \log_{10}$. La manière dont ces unités sont interprétées est décrite dans les notes (g) et (h) du tableau 8. Il est rarement nécessaire de donner une valeur numérique à ces unités. L'usage des unités néper, bel, et décibel avec le SI a été accepté par le Comité international, mais ces unités ne sont pas considérées comme des unités SI.

Les préfixes SI sont utilisés avec deux des unités du tableau 8, à savoir avec le bar (par exemple millibar, mbar) et le bel, en particulier le décibel, dB. Le décibel est explicitement mentionné dans le tableau parce que le bel est rarement utilisé sans ce préfixe.

Tableau 8. Autres unités en dehors du SI

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Valeur en unités SI
pression	bar ^(a)	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
	millimètre de mercure ^(b)	mmHg	1 mmHg = 133,322 Pa
longueur	ångström ^(c)	Å	1 Å = 0,1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
distance	mille marin ^(d)	M	1 M = 1852 m
superficie	barn ^(e)	b	1 b = 100 fm ² = (10 ⁻¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
vitesse	noeud ^(f)	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
logarithme	néper ^(g, i)	Np	[voir note (j) au sujet de la valeur
d'un rapport	bel ^(h, i)	B	numérique du néper, du bel et du décibel]
	décibel ^(h, i)	dB	

(a) Le bar et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948 ; CR, 70). Depuis 1982, toutes les données thermodynamiques sont tabulées pour la pression normale de un bar. Avant 1982, la pression normale était l'atmosphère normale, égale à 1,013 25 bar, ou 101 325 Pa.

(b) Le millimètre de mercure est l'unité légale pour la mesure de la pression sanguine dans certains pays.

(c) L'ångström est largement utilisé dans le domaine de la cristallographie aux rayons x et en chimie de la structure parce que la longueur des liaisons chimiques se situe dans le domaine compris entre 1 et 3 ångströms. L'ångström n'a toutefois pas été sanctionné par le Comité international ni par la Conférence générale.

(d) Le mille marin est une unité employée en navigation maritime et aérienne pour exprimer les distances. Cette valeur fut adoptée par convention par la Première Conférence hydrographique internationale extraordinaire, Monaco, 1929, sous le nom de « mille marin international ». Il n'existe pas de symbole convenu au niveau international, mais les symboles M, NM, Nm et nmi sont utilisés ; seul le symbole M est indiqué dans le tableau 8. Cette unité avait été choisie

à l'origine, et continue à être utilisée, parce qu'un mille marin à la surface de la Terre est sous-tendu approximativement par une minute d'angle au centre de la Terre, ce qui est commode quand la latitude et la longitude sont mesurées en degrés et minutes d'angle.

- (e) Le barn est une unité de superficie employée en physique nucléaire pour exprimer les sections efficaces.
- (f) Le nœud correspond à un mille marin par heure. Il n'existe pas de symbole convenu au niveau international, mais le symbole kn est habituellement utilisé.
- (g) L'égalité $L_A = n \text{ Np}$ (où n est un nombre) est comprise comme signifiant que $\ln(A_2/A_1) = n$. Ainsi lorsque $L_A = 1 \text{ Np}$, $A_2/A_1 = e$. Le symbole A est utilisé ici pour désigner l'amplitude d'un signal sinusoïdal, et L_A est alors appelé logarithme néperien du rapport d'amplitude, ou différence de niveau d'amplitude néperien.
- (h) L'égalité $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$ (où m est un nombre) est comprise comme signifiant que $\lg(X/X_0) = m/10$. Ainsi lorsque $L_X = 1 \text{ B}$, $X/X_0 = 10$, et lorsque $L_X = 1 \text{ dB}$, $X/X_0 = 10^{1/10}$. Si X désigne un signal quadratique moyen ou une grandeur de type puissance, L_X est appelé niveau de puissance par référence à X_0 .
- (i) Lorsque l'on utilise ces unités, il est important de préciser quelle est la nature de la grandeur en question et la valeur de référence utilisée. Ces unités ne sont pas des unités du SI, mais leur usage avec le SI a été accepté par le Comité international.
- (j) Il est rarement nécessaire de préciser les valeurs numériques du néper, du bel et du décibel (et la relation du bel et du décibel au néper). Ceci dépend de la manière dont les grandeurs logarithmiques sont définies.

Le tableau 9 diffère du tableau 8 en ce que les unités mentionnées au tableau 9 sont reliées aux anciennes unités du système CGS (centimètre, gramme, seconde), y compris les unités électriques CGS. Dans le domaine de la mécanique, le système d'unités CGS était fondé sur trois grandeurs et leurs unités de base correspondantes : le centimètre, le gramme et la seconde. Les unités électriques CGS continuent à être dérivées de ces trois unités de base seulement, au moyen d'équations différentes de celles utilisées dans le SI. Cela pouvant être réalisé de différentes façons, plusieurs systèmes différents ont été établis : le système CGS-UES (électrostatique), le système CGS-UEM (électromagnétique) et le système d'unités CGS de Gauss. Il a toujours été reconnu que le système CGS de Gauss, en particulier, présente des avantages dans certains domaines de la physique, comme l'électrodynamique classique et relativiste (9^e CGPM, 1948, Résolution 6). Le tableau 9 donne les relations entre les unités CGS et le SI, ainsi que la liste des unités CGS qui ont reçu un nom spécial. Comme pour les unités du tableau 8, les préfixes SI sont utilisés avec plusieurs de ces unités (par exemple millidyne, mdyne ; milligauss, mG etc.).

Tableau 9. Unités en dehors du SI associées aux systèmes d'unités CGS et CGS de Gauss

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Valeur en unités SI
énergie	erg ^(a)	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
force	dyne ^(a)	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
viscosité dynamique	poise ^(a)	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0,1 Pa s
viscosité cinématique	stokes	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
luminance lumineuse	stilb ^(a)	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
éclairage lumineux	phot	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
accélération	gal ^(b)	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² m s ⁻²
flux magnétique	maxwell ^(c)	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
induction magnétique	gauss ^(c)	G	1 G = 1 Mx/cm ² = 10 ⁻⁴ T
champ magnétique	oersted ^(c)	Oe	1 Oe $\hat{=}$ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

- (a) Cette unité et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948 ; CR, 70).
 - (b) Le gal est une unité employée en géodésie et géophysique pour exprimer l'accélération due à la pesanteur.
 - (c) Ces unités font partie du système CGS tri-dimensionnel « électromagnétique », fondé sur des équations aux grandeurs non rationalisées. Elles doivent donc être comparées avec soin aux unités correspondantes du Système international qui sont fondées sur des équations rationalisées à quatre dimensions et quatre grandeurs en électromagnétisme. Le flux magnétique Φ et l'induction magnétique B sont définis par des équations similaires dans le système CGS et dans le SI, ce qui permet de relier les unités correspondantes dans le tableau. Cependant, le champ magnétique non rationalisé $H(\text{non rationalisé})$ est égal à $4\pi \times H(\text{rationalisé})$. Le symbole d'équivalence $\hat{=}$ est utilisé pour indiquer que lorsque $H(\text{non rationalisé}) = 1 \text{ Oe}$, $H(\text{rationalisé}) = (10^3/4\pi) \text{ A m}^{-1}$.
-

4.2 Autres unités en dehors du SI dont l'usage n'est pas recommandé

Il existe de nombreuses unités en dehors du SI, trop nombreuses pour être citées ici, qui présentent soit un intérêt historique, ou qui sont encore utilisées dans un domaine spécialisé (comme le baril de pétrole) ou dans certains pays (comme le pouce, le pied ou le yard). Le Comité international ne voit aucune raison de continuer à utiliser ces unités dans les travaux scientifiques et techniques modernes. Cependant, il est important de connaître la relation entre ces unités et les unités SI correspondantes, et ceci restera vrai encore de nombreuses années. Le Comité international a donc décidé de compiler une liste des facteurs de conversion en unités SI d'unités de ce type. Cette liste peut être consultée sur le site Web du BIPM à l'adresse :

www.bipm.org/fr/si/si_brochure/chapter4/conversion_factors.html.

5 Règles d'écriture des noms et symboles d'unités et expression des valeurs des grandeurs

Les principes généraux concernant l'écriture des symboles des unités et des nombres furent d'abord proposés par la 9^e CGPM (1948, Résolution 7). Ils furent ensuite adoptés et mis en forme par l'ISO, la CEI et par d'autres organisations internationales. Il en résulte maintenant un consensus général sur la manière dont les symboles et noms d'unités, y compris les symboles et noms de préfixes, ainsi que les symboles et les valeurs des grandeurs, doivent être exprimés. Le respect de ces règles et des conventions de style, dont les plus importantes sont présentées dans ce chapitre, aide à la lisibilité des articles scientifiques et techniques.

5.1 Symboles des unités

Les symboles des unités sont imprimés en caractères romains (droits), quelle que soit la police employée dans le texte où ils figurent. En général les symboles des unités sont écrits en minuscules, mais, si le nom de l'unité dérive d'un nom propre, la première lettre du symbole est majuscule.

m, mètre
s, seconde
Pa, pascal
 Ω , ohm

Le symbole du litre constitue une exception à cette règle. La 16^e Conférence générale (1979, Résolution 6) a approuvé l'utilisation de la lettre L en majuscule ou l en minuscule comme symbole du litre, afin d'éviter la confusion entre le chiffre 1 (un) et la lettre l.

L ou l, litre

Si l'on utilise un préfixe de multiple ou sous-multiple, celui-ci fait partie de l'unité et il précède le symbole de l'unité, sans espace entre le symbole du préfixe et le symbole de l'unité. Un préfixe n'est jamais utilisé seul et l'on n'utilise jamais de préfixes composés.

nm, **mais pas** mµm

Les symboles d'unités 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. Ils restent invariables au pluriel et il ne faut pas mélanger des symboles avec des noms d'unités dans une même expression, puisque les noms ne sont pas des entités mathématiques.

Cela fait 75 cm de long,
mais pas 75 cm. de long
 $l = 75 \text{ cm}$,
mais pas 75 cms

coulomb par kilogramme,
mais pas coulomb par kg

Les règles classiques de multiplication ou de division algébriques s'appliquent pour former les produits et quotients de symboles d'unités. La multiplication doit être indiquée par un espace ou un point à mi-hauteur centré ($\cdot$), pour éviter que certains préfixes soient interprétés à tort comme un symbole d'unité. La division est indiquée par une ligne horizontale, par une barre oblique (/) ou par des exposants négatifs. Lorsque l'on combine plusieurs symboles d'unités, il faut prendre soin d'éviter toute ambiguïté, par exemple en utilisant des crochets ou des parenthèses, ou des exposants négatifs. Il ne faut pas utiliser plus d'une barre oblique dans une expression donnée s'il n'y a pas de parenthèses pour lever toute ambiguïté.

N m ou N $\cdot$ m,
pour newton mètre
m/s ou $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ou m s^{-1} ,
pour mètre par seconde

ms, milliseconde
m s, mètre seconde

$\text{m kg}/(\text{s}^3 \text{ A})$,
ou $\text{m kg s}^{-3} \text{ A}^{-1}$
mais pas $\text{m kg/s}^3/\text{A}$
ni $\text{m kg/s}^3 \text{ A}$

Il n'est pas autorisé d'utiliser des abréviations pour les symboles et noms d'unités, comme sec (pour s ou seconde), mm car. (pour mm^2 ou millimètre carré), cc (pour

cm³ ou centimètre cube), ou mps (pour m/s ou mètre par seconde). L'utilisation correcte des symboles des unités SI, et des unités en général, dont il a été fait mention dans les chapitres précédents de cette brochure, est obligatoire. C'est ainsi que l'on évite les ambiguïtés et les erreurs de compréhension concernant les valeurs des grandeurs.

5.2 Noms des unités

Les noms des unités sont imprimés en caractères romains (droits), et sont considérés comme des noms ordinaires. En français, et en anglais, les noms d'unités commencent par une minuscule (même si le symbole de l'unité commence par une majuscule), sauf s'ils se trouvent placés au début d'une phrase ou dans un titre en majuscules. Selon cette règle, l'écriture correcte du nom de l'unité dont le symbole est °C est « degré Celsius » (l'unité degré commence par la lettre d en minuscule et le qualificatif « Celsius » commence par la lettre C en majuscule, parce que c'est un nom propre).

Bien que les valeurs des grandeurs soient généralement exprimées au moyen de nombres et de symboles d'unités, si pour une raison quelconque le nom de l'unité est mieux approprié que son symbole, il convient d'écrire en toutes lettres le nom de l'unité.

Lorsque le nom de l'unité est accolé au nom d'un préfixe d'un multiple ou sous-multiple, il n'y a pas d'espace ni de tiret entre le nom du préfixe et celui de l'unité. L'ensemble formé du nom de préfixe et de celui de l'unité constitue un seul mot (*voir aussi* chapitre 3, section 3.1, p. 32).

En français et en anglais, toutefois, lorsque le nom d'une unité dérivée est constitué par multiplication de noms d'unités individuelles, il convient d'utiliser un espace ou un tiret pour séparer chaque nom d'unité.

En français et en anglais, les puissances telles que « carré » ou « cube » utilisées dans les noms d'unités sont placées après le nom de l'unité. En anglais, pour les unités de superficie ou de volume on peut toutefois utiliser les termes « square » ou « cubic », avant le nom de l'unité (des exemples sont donnés à la page 131).

nom d'unité	symbole
joule	J
hertz	Hz
mètre	m
seconde	s
ampère	A
watt	W

2,6 m/s,
ou 2,6 mètres par seconde

milligramme,
mais pas milli-gramme

kilopascal
mais pas kilo-pascal

pascal seconde,
ou pascal-seconde

mètre par seconde carrée,
centimètre carré,
millimètre cube,
ampère par mètre carré,
kilogramme par mètre cube

5.3 Règles et conventions stylistiques servant à exprimer les valeurs des grandeurs

5.3.1 Valeur et valeur numérique d'une grandeur ; utilisation du calcul formel

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. La valeur numérique d'une grandeur dépend du choix de l'unité. Ainsi, la valeur d'une grandeur particulière est indépendante du choix de l'unité, mais la valeur numérique est différente selon l'unité choisie.

Les symboles des grandeurs sont en général formés d'une seule lettre en italique, mais ils peuvent être précisés par des informations complémentaires en indice, exposant ou entre parenthèses. Ainsi *C* est le symbole recommandé pour la capacité thermique, *C_m* pour la capacité thermique molaire, *C_{m,p}* pour la capacité thermique molaire à pression constante, et *C_{m,v}* pour la capacité thermique molaire à volume constant.

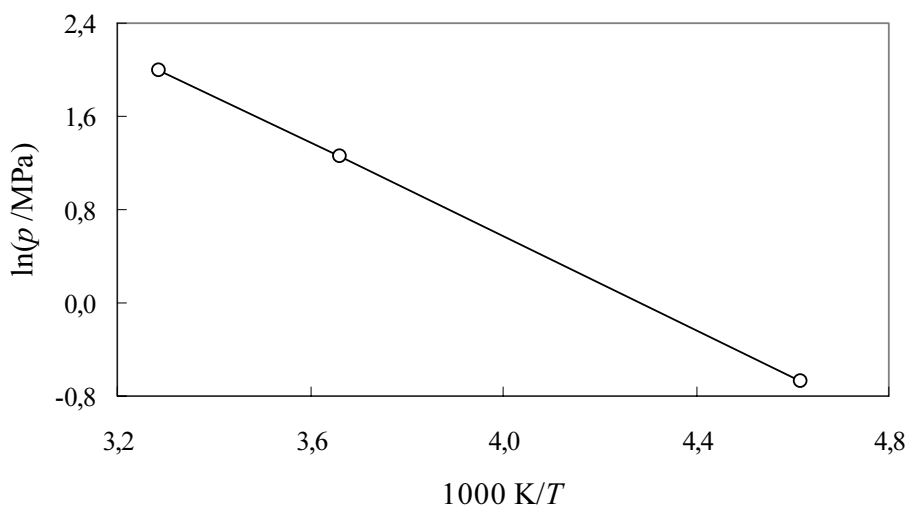
La valeur de la vitesse d'une particule $v = dx/dt$ peut être exprimée par les expressions $v = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$, où 25 est la valeur numérique de la vitesse exprimée dans l'unité mètre par seconde et 90 celle exprimée dans l'unité kilomètre par heure.

Les noms et symboles recommandés pour les grandeurs figurent dans de nombreux ouvrages de référence, comme la norme ISO 31 *Grandeurs et unités*, le « livre rouge » de l'UIPPA SUNAMCO, *Symbols, Units and Nomenclature in Physics*, et le « livre vert » de l'UICPA, *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*. Toutefois, les symboles des grandeurs ne sont que recommandés, alors qu'il est obligatoire d'utiliser les symboles corrects des unités. Dans des circonstances particulières, les auteurs peuvent préférer utiliser le symbole de leur choix pour une grandeur donnée, par exemple pour éviter un conflit résultant de l'utilisation du même symbole pour deux grandeurs différentes. Il faut alors préciser clairement quelle est la signification du symbole. Le nom d'une grandeur, ou le symbole utilisé pour l'exprimer, n'oblige en aucun cas à choisir une unité en particulier.

Les symboles des unités sont traités comme des entités mathématiques. Lorsque l'on exprime la valeur d'une grandeur comme le produit d'une valeur numérique par une unité, la valeur numérique et l'unité peuvent être traitées selon les règles ordinaires de l'algèbre. Une telle démarche correspond à l'utilisation du calcul formel. Par exemple l'équation $T = 293 \text{ K}$ peut aussi s'écrire $T/\text{K} = 293$. Il est souvent commode d'écrire ainsi le quotient d'une grandeur et d'une unité en tête de colonne d'un tableau, afin que les entrées du tableau soient simplement des nombres. Par exemple, un tableau exprimant la pression de vapeur en fonction de la température, et le logarithme naturel de la pression de vapeur en fonction de la température à la puissance moins un, peut prendre la forme suivante :

T/K	$10^3 \text{ K}/T$	p/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

Les axes d'un graphique peuvent aussi être symbolisés de cette manière, afin que les graduations soient purement numériques, comme indiqué sur la figure ci-dessous.



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

5.3.2 Symboles des grandeurs et des unités

De même que le symbole d'une grandeur n'implique pas un choix particulier d'unité, le symbole de l'unité ne doit pas être utilisé pour fournir des informations spécifiques sur la grandeur en question, et il ne doit jamais être la seule source d'information sur la grandeur. Les unités ne doivent jamais servir à fournir des informations complémentaires sur la nature de la grandeur ; ce type d'information doit être attaché au symbole de la grandeur et pas à celui de l'unité.

Ainsi :
La différence de potentiel électrique maximale s'exprime sous la forme :
 $U_{\text{max}} = 1000 \text{ V}$
mais pas $U = 1000 \text{ V}_{\text{max}}$.
La fraction massique du cuivre de l'échantillon de silicium s'exprime sous la forme : $w(\text{Cu}) = 1,3 \times 10^{-6}$
mais pas $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$.

5.3.3 Écriture de la valeur d'une grandeur

La valeur numérique précède toujours l'unité et il y a toujours un espace entre le nombre et l'unité. Ainsi la valeur d'une grandeur étant le produit d'un nombre par une unité, l'espace est considéré comme un signe de multiplication (tout comme l'espace entre les unités). Les seules exceptions à la règle sont les symboles d'unité pour le degré, la minute et la seconde d'angle plan, °, ', et ", respectivement, pour lesquels il n'y a pas d'espace entre la valeur numérique et le symbole d'unité.

Cette règle signifie que le symbole °C pour le degré Celsius est précédé d'un espace pour exprimer la valeur de la température Celsius t .

Même lorsque la valeur d'une grandeur est utilisée comme adjectif, il convient de laisser un espace entre la valeur numérique et le symbole de l'unité. Ce n'est que lorsque l'on écrit le nom de l'unité en toutes lettres que l'on applique les règles grammaticales ordinaires (voir un exemple en anglais page 133).

Dans une expression, on n'utilise qu'une seule unité. Les valeurs des grandeurs temps et angle plan exprimées au moyen d'unités en dehors du SI font exception à cette règle. Toutefois, en ce qui concerne l'angle plan, il est généralement préférable de diviser le degré de manière décimale. Ainsi l'on écrira $22,20^\circ$ plutôt que $22^\circ 12'$, sauf dans les domaines tels que la navigation, la cartographie, l'astronomie et pour la mesure d'angles très petits.

$m = 12,3 \text{ g}$ où m est utilisé comme symbole de la grandeur masse, mais $\varphi = 30^\circ 22' 8''$ où φ est utilisé comme symbole de la grandeur angle plan.

$t = 30,2^\circ \text{C}$
mais pas $t = 30,2^\circ \text{C}$
ni $t = 30,2^\circ \text{C}$

une résistance de $10 \text{ k}\Omega$

un film de 35 millimètres de largeur

$l = 10,234 \text{ m}$
mais pas
 $l = 10 \text{ m } 23,4 \text{ cm}$

5.3.4 Écriture des nombres et séparateur décimal

Le symbole utilisé pour séparer le nombre entier de sa partie décimale est appelé *séparateur décimal*. D'après la 22^e Conférence générale (2003, Résolution 10), « le symbole du séparateur décimal pourra être le point sur la ligne ou la virgule sur la ligne ». Le séparateur décimal choisi sera celui qui est d'usage courant dans le contexte.

Si le nombre se situe entre +1 et -1, le séparateur décimal est toujours précédé d'un zéro.

-0,234
mais pas -,234

D'après la 9^e Conférence générale (1948, Résolution 7) et la 22^e Conférence générale (2003, Résolution 10), les nombres comportant un grand nombre de chiffres peuvent être partagés en tranches de trois chiffres, séparées par un espace, afin de faciliter la lecture. Ces tranches ne sont jamais séparées par des points, ni par des virgules. Cependant, lorsqu'il n'y a que quatre chiffres avant ou après le séparateur décimal, il est d'usage de ne pas isoler un chiffre par un espace. L'habitude de grouper ainsi les

43 279,168 29
mais pas 43.279,168.29

3279,1683
ou 3 279,168 3

chiffres est question de choix personnel ; elle n'est pas toujours suivie dans certains domaines spécialisés tels que le dessin industriel, les documents financiers et les scripts qui doivent être lus par ordinateur.

En ce qui concerne les nombres d'un tableau, le format utilisé doit être cohérent dans une même colonne.

5.3.5 Expression de l'incertitude de mesure associée à la valeur d'une grandeur

L'incertitude associée à la valeur estimée d'une grandeur doit être évaluée et exprimée en accord avec le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* [ISO, 1995]. L'incertitude-type, c'est-à-dire l'écart-type estimé (correspondant à un facteur d'élargissement $k = 1$), associée à une grandeur x est désignée par $u(x)$. Un moyen commode de représenter l'incertitude est donné dans l'exemple suivant :

$$m_n = 1,674\,927\,28\,(29) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

où m_n est le symbole de la grandeur (ici la masse du neutron) et le nombre entre parenthèses la valeur numérique de l'incertitude-type composée sur les deux derniers chiffres de la valeur estimée de m_n , dans le cas présent :

$$u(m_n) = 0,000\,000\,29 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

Si l'on utilise un facteur d'élargissement k différent de 1, il faut le préciser.

5.3.6 Multiplication ou division des symboles des grandeurs, des valeurs des grandeurs et des nombres

Pour multiplier ou diviser les symboles des grandeurs, il est possible d'utiliser n'importe laquelle des écritures suivantes : ab , $a\,b$, $a \cdot b$, $a \times b$, a/b , $\frac{a}{b}$, $a\,b^{-1}$.

Lorsque l'on multiplie la valeur des grandeurs, il convient d'utiliser soit un signe de multiplication, $\times$, des parenthèses (ou des crochets), mais pas le point à mi-hauteur (centré). Lorsque l'on multiplie des nombres, il convient d'utiliser uniquement le signe de multiplication, $\times$.

Lorsque l'on divise les valeurs des grandeurs au moyen d'une barre oblique, on utilise des parenthèses pour lever toute ambiguïté.

Exemples :

$F = ma$ pour une force égale à la masse multipliée par l'accélération

$(53 \text{ m/s}) \times 10,2 \text{ s}$
ou $(53 \text{ m/s})(10,2 \text{ s})$

$25 \times 60,5$
mais pas $25 \cdot 60,5$

$(20 \text{ m})/(5 \text{ s}) = 4 \text{ m/s}$

$(a/b)/c$, **mais pas** $a/b/c$

5.3.7 Valeur des grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un

Comme nous l'avons vu dans la section 2.2.3, l'unité SI cohérente des grandeurs sans dimension, ou grandeurs de dimension un, est le nombre un, symbole 1. Les valeurs de ces grandeurs sont exprimées simplement par des nombres. Le symbole d'unité 1 ou nom d'unité « un » n'est pas mentionné explicitement, et il n'y a pas de symbole particulier ni de nom spécial pour l'unité un, à quelques exceptions près mentionnées ci-dessous. Pour la grandeur angle plan, l'unité un porte le nom spécial radian, symbole rad, et pour la grandeur angle solide, elle porte le nom spécial stéradian, symbole sr. Pour les logarithmes de rapports de grandeurs, les noms spéciaux néper, symbole Np, bel, symbole B, et décibel, symbole dB, sont utilisés (voir 4.1 et tableau 8, p. 38).

Parce que les symboles de préfixes SI ne peuvent pas être attachés au symbole 1 ni au nom d'unité « un », les puissances de 10 sont utilisées pour exprimer les valeurs de grandeurs sans dimension particulièrement grandes ou particulièrement petites.

$n = 1,51$
mais pas $n = 1,51 \times 1$
où n est le symbole de la grandeur indice de réfraction.

Dans les expressions mathématiques, le symbole % (pourcent), reconnu internationalement, peut être utilisé avec le SI pour représenter le nombre 0,01. Ainsi, il peut être utilisé pour exprimer les valeurs des grandeurs sans dimension. Quand il est utilisé, il convient de mettre un espace entre le nombre et le symbole %. Lorsque l'on exprime les valeurs des grandeurs sans dimension de cette manière, il est préférable d'utiliser le symbole % plutôt que le nom « pourcent ».

Dans un texte écrit, le symbole % signifie en général « un pour cent ».

Les expressions telles que « pourcentage de masse », « pourcentage de volume », « pourcentage de quantité de matière », ne doivent pas être utilisées ; les informations sur la grandeur en question doivent être données par le nom et le symbole de la grandeur.

Lorsque l'on exprime les valeurs de fractions sans dimension (par exemple fraction massique, fraction volumique, incertitude relative etc.), il est parfois utile d'employer le rapport entre deux unités de même nature.

Le terme « ppm », qui signifie 10^{-6} en valeur relative, ou 1×10^{-6} , ou « partie par million, millionième », est aussi utilisé. Les termes « partie par milliard » [billion (États-Unis)/trillion (Royaume-Uni)], et leurs abréviations respectives « ppb » et « ppt », sont aussi utilisés, mais leur signification varie selon la langue, c'est pourquoi il est préférable d'éviter de les employer. (Bien que dans les pays de langue anglaise le terme « billion » corresponde à 10^9 , et le terme « trillion » à 10^{12} , le terme « billion » peut parfois correspondre à 10^{12} et « trillion » à 10^{18} . L'abréviation ppt est aussi parfois comprise comme une partie par millier (ou millième), ce qui est source de confusion supplémentaire.)

Il est important de spécifier quelle est la grandeur (sans dimension) dont on donne la valeur, quand on utilise l'un des termes %, ppm etc.

$x_B = 0,0025 = 0,25 \%$,
où x_B est le symbole de la
grandeur fraction de
quantité (fraction molaire)
de l'entité B.

Le miroir reflète 95 % des
photons incidents.

$\varphi = 3,6 \%$
mais pas $\varphi = 3,6 \%$ (V/V),
où φ est la fraction
volumique.

$x_B = 2,5 \times 10^{-3}$
 $= 2,5 \text{ mmol/mol}$

$u_r(U) = 0,3 \mu V/V$
où $u_r(U)$ est l'incertitude
relative de la tension
mesurée U .

Annexe 1. Décisions de la Conférence générale des poids et mesures et du Comité international des poids et mesures

Cette annexe regroupe les décisions de la Conférence générale et du Comité international qui concernent directement les définitions des unités SI, les préfixes à utiliser avec le SI, ainsi que les conventions relatives à l'écriture des symboles d'unités et des nombres. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive des décisions de la Conférence générale et du Comité international. Pour consulter toutes ces décisions, il faut se référer aux volumes successifs des *Comptes rendus* de la Conférence générale des poids et mesures (CR) et des *Procès-verbaux* du Comité international des poids et mesures (PV), et aussi, pour les décisions récentes, à *Metrologia*.

Le SI n'est pas statique, il suit les progrès de la métrologie, aussi certaines décisions ont-elles été abrogées ou modifiées ; d'autres ont été précisées par des adjonctions. Les décisions qui ont fait l'objet d'un changement sont identifiées par un astérisque (*) et renvoient à une note qui fait référence à la décision qui officialise cette modification.

Le texte original des décisions figure dans une police différente (sans empattement) pour le distinguer du texte principal. Les astérisques et notes ont été ajoutés par le BIPM pour rendre le texte plus compréhensible. Ils ne font pas partie des décisions proprement dites.

Les décisions de la Conférence générale et du Comité international figurent dans cette annexe par ordre chronologique, de 1889 à 2005, afin de préserver la continuité. Cependant, afin de pouvoir identifier facilement les décisions concernant un domaine particulier, nous avons ajouté une table des matières, par sujet, indiquant les réunions pendant lesquelles ces décisions ont été adoptées et donnant les numéros des pages où sont reproduites les publications originelles.

Table des matières de l'annexe 1

Décisions concernant l'établissement du SI		page
9 ^e CGPM, 1948 :	décision d'établir le SI	55
10 ^e CGPM, 1954 :	décision d'adopter les six premières unités de base	57
CIPM 1956 :	décision d'adopter le nom Système international d'unités	58
11 ^e CGPM, 1960 :	confirme le nom et l'abréviation SI,	59
	noms des préfixes téra à pico,	59
	établit les unités supplémentaires rad et sr,	60
	établit la liste de certaines unités dérivées	60
CIPM, 1969 :	déclarations concernant les unités de base, supplémentaires, dérivées et cohérentes, et utilisation des préfixes	65
CIPM, 2001	« unités SI » et « unités du SI »	77
 Décisions concernant les unités de base du SI		
Longueur		
1 ^{re} CGPM, 1889 :	sanction du Prototype du mètre	52
7 ^e CGPM, 1927 :	définition du mètre par le Prototype international	53
11 ^e CGPM, 1960 :	redéfinition du mètre au moyen de la radiation du krypton 86	58
15 ^e CGPM, 1975 :	recommande la valeur de la vitesse de la lumière	67
17 ^e CGPM, 1983 :	redéfinition du mètre en fonction de la vitesse de la lumière,	71
	mise en pratique de la définition du mètre	71
CIPM, 2002 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre	77
CIPM, 2003 :	révision de la liste des radiations recommandées	80
CIPM, 2005 :	révision de la liste des radiations recommandées	82
 Masse		
1 ^{re} CGPM, 1889 :	sanction du Prototype du kilogramme	52
3 ^e CGPM, 1901 :	déclaration au sujet de la différence entre masse et poids, et valeur conventionnelle de g_n	53
CIPM, 1967 :	déclaration sur les préfixes du gramme	62
21 ^e CGPM, 1999 :	redéfinition éventuelle du kilogramme	76
 Temps		
CIPM, 1956 :	définition de la seconde comme la fraction de l'année tropique 1900	57
11 ^e CGPM, 1960 :	ratifie la définition de la seconde donnée par le CIPM en 1956	59
CIPM, 1964 :	déclare que l'étalon à employer est la transition hyperfine du césium 133	61

	page
12 ^e CGPM, 1964 : donne pouvoir au CIPM de désigner les étalons de fréquence atomique et moléculaire à employer	61
13 ^e CGPM, 1967/68 : définit la seconde au moyen de la transition du césium	63
CCDS, 1970 : définit le Temps atomique international, TAI	66
14 ^e CGPM, 1971 : demande au CIPM de définir et d'établir le Temps atomique international, TAI	66
15 ^e CGPM, 1975 : sanctionne le Temps universel coordonné, UTC	67
 Unités électriques	
CIPM, 1946 : définition des unités mécaniques et électriques dans le SI	54
14 ^e CGPM, 1971 : adopte le nom siemens, symbole S, pour la conductance électrique	66
18 ^e CGPM, 1987 : ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm	72
CIPM, 1988 : effet Josephson	73
CIPM, 1988 : effet Hall quantique	74
CIPM, 2000 : réalisation de l'ohm au moyen de la valeur de la constante de von Klitzing	77
 Température thermodynamique	
9 ^e CGPM, 1948 : adopte le point triple de l'eau comme point de référence pour la température thermodynamique, adopte le degré Celsius, et fixe le zéro comme étant la température de référence inférieure de 0,01 degré à celle du point triple de l'eau	54 55
CIPM, 1948 : adopte le nom degré Celsius pour l'échelle de température Celsius	55
10 ^e CGPM, 1954 : définit la température thermodynamique du point triple de l'eau à 273,16 degrés Kelvin exactement, définit l'atmosphère normale	57 57
13 ^e CGPM, 1967/68 : définit officiellement le kelvin, symbole K	64
CIPM, 1989 : Échelle internationale de température de 1990, EIT-90	74
CIPM, 2005 : note ajoutée à la définition du kelvin à propos de la composition isotopique de l'eau	81
 Quantité de matière	
14 ^e CGPM, 1971 : définition de la mole, symbole mol, comme 7 ^e unité de base, et règles d'utilisation	67
21 ^e CGPM, 1999 : adopte le nom spécial katal, kat	76

Intensité lumineuse	page
CIPM, 1946 : définition des unités photométriques, bougie nouvelle et lumen nouveau	53
13 ^e CGPM, 1967/68 : définit la candela, symbole cd, en fonction du corps noir	64
16 ^e CGPM, 1979 : redéfinit la candela à partir d'un rayonnement monochromatique	68
 Décisions concernant les unités SI dérivées et les unités supplémentaires	
Unités SI dérivées	
12 ^e CGPM, 1964 : accepte de continuer à utiliser le curie comme unité en dehors du SI	62
13 ^e CGPM, 1967/68 : donne des exemples d'unités dérivées	64
15 ^e CGPM, 1975 : adopte les noms spéciaux becquerel, Bq, et gray, Gy	68
16 ^e CGPM, 1979 : adopte le nom spécial sievert, Sv	69
CIPM, 1984 : décide de clarifier les relations entre la dose absorbée (unité SI gray) et l'équivalent de dose (unité SI sievert)	72
CIPM, 2002 : modifie les relations entre la dose absorbée et l'équivalent de dose	79
 Unités supplémentaires	
CIPM, 1980 : décide d'interpréter les unités supplémentaires comme des unités dérivées sans dimension	70
20 ^e CGPM, 1995 : décide de supprimer la classe des unités supplémentaires, et confirme l'interprétation du CIPM selon laquelle ce sont des unités dérivées sans dimension	75
 Décisions concernant la terminologie et approbation des unités en usage avec le SI	
Préfixes SI	
12 ^e CGPM, 1964 : décide d'ajouter femto et atto à la liste des préfixes	62
15 ^e CGPM, 1975 : décide d'ajouter péta et exa à la liste des préfixes	68
19 ^e CGPM, 1991 : décide d'ajouter zetta, zepto, yotta et yocto à la liste des préfixes	75
 Symboles d'unités et nombres	
9 ^e CGPM, 1948 : décide des règles d'écriture des symboles d'unités et des nombres	56
 Noms d'unités	
13 ^e CGPM, 1967/68 : abroge l'utilisation du micron et de la bougie nouvelle comme unités en usage avec le SI	65

Séparateur décimal	page
22 ^e CGPM, 2003 : décide d'autoriser l'usage du point ou de la virgule sur la ligne comme séparateur décimal	80
 Unités en usage avec le SI : un exemple, le litre	
3 ^e CGPM, 1901 : définit le litre comme le volume d'un 1 kg d'eau	52
11 ^e CGPM, 1960 : demande au CIPM d'étudier la différence entre le décimètre cube et le litre	60
CIPM, 1961 : recommande d'exprimer les volumes en unités SI et non en litres	61
12 ^e CGPM, 1964 : abroge la précédente définition du litre et recommande d'utiliser le litre comme nom spécial donné au décimètre cube	62
16 ^e CGPM, 1979 : décide, à titre exceptionnel, d'autoriser les deux symboles L et l pour le litre	69

1^{re} CGPM, 1889**■ Sanction des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme (CR, 34-38)***

La Conférence générale,

considérant

- le « Compte rendu du Président du Comité international » et le « Rapport du Comité international des poids et mesures », d'où il résulte que, par les soins communs de la Section française de la Commission internationale du Mètre, et du Comité international des poids et mesures, les déterminations métrologiques fondamentales des prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme ont été exécutées dans toutes les conditions de garantie et de précision que comporte l'état actuel de la science ;
- que les prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme sont formés de platine allié à 10 pour 100 d'iridium, à 0,0001 près ;
- l'identité de longueur du Mètre et l'identité de la masse du Kilogramme internationaux avec la longueur du Mètre et la masse du Kilogramme déposés aux Archives de France ;
- que les équations des Mètres nationaux, par rapport au Mètre international, sont renfermées dans la limite de 0,01 millimètre et que ces équations reposent sur une échelle thermométrique à hydrogène qu'il est toujours possible de reproduire, à cause de la permanence de l'état de ce corps, en se plaçant dans des conditions identiques ;
- que les équations des Kilogrammes nationaux, par rapport au Kilogramme international, sont renfermées dans la limite de 1 milligramme ;
- que le Mètre et le Kilogramme internationaux et que les Mètres et les Kilogrammes nationaux remplissent les conditions exigées par la Convention du Mètre,

sanctionne

A. En ce qui concerne les prototypes internationaux :

1. Le Prototype du mètre choisi par le Comité international. Ce prototype représentera désormais, à la température de la glace fondante, l'unité métrique de longueur.
2. Le Prototype du kilogramme adopté par le Comité international. Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.
3. L'échelle thermométrique centigrade à hydrogène par rapport à laquelle les équations des Mètres prototypes ont été établies.

B. En ce qui concerne les prototypes nationaux :

...

* La définition du mètre a été abrogée en 1960 par la 11^e CGPM (Résolution 6, voir p. 58).

3^e CGPM, 1901**■ Déclaration concernant la définition du litre (CR, 38-39)***

...

La Conférence déclare :

1. L'unité de volume, pour les déterminations de haute précision, est le volume occupé par la masse de 1 kilogramme d'eau pure, à son maximum de densité et sous la pression atmosphérique normale ; ce volume est dénommé « litre ».
2. ...

* Définition abrogée en 1964 par la 12^e CGPM (Résolution 6, voir p. 62).

■ Déclaration relative à l'unité de masse et à la définition du poids ; valeur conventionnelle de g_n (CR, 70)

Vu la décision du Comité international des poids et mesures du 15 octobre 1887, par laquelle le kilogramme a été défini comme unité de masse ;

Vu la décision contenue dans la formule de sanction des prototypes du Système métrique, acceptée à l'unanimité par la Conférence générale des poids et mesures dans sa réunion du 26 septembre 1889 ;

Considérant la nécessité de faire cesser l'ambiguïté qui existe encore dans l'usage courant sur la signification du terme *poids*, employé tantôt dans le sens du terme *masse*, tantôt dans le sens du terme *effort mécanique* ;

La Conférence déclare :

1. Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme ;
2. 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 ;
3. 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.

Cette valeur de g_n est la valeur conventionnelle de référence pour le calcul de l'unité kilogramme-force maintenant abolie.

7^e CGPM, 1927

■ Définition du mètre par le Prototype international (CR, 49)*

L'unité de longueur est le mètre, défini par la distance, à 0°, des axes des deux traits médians tracés sur la barre de platine iridié déposée au Bureau international des poids et mesures, et déclarée Prototype du mètre par la Première Conférence générale des poids et mesures, cette règle étant soumise à la pression atmosphérique normale et supportée par deux rouleaux d'au moins un centimètre de diamètre, situés symétriquement dans un même plan horizontal et à la distance de 571 mm l'un de l'autre.

* Définition abrogée en 1960 par la 11^e CGPM (Résolution 6, voir p. 58).

CIPM, 1946

■ Définition des unités photométriques (PV, 20, 119-122)*

Résolution

...

4. Les unités photométriques peuvent être définies comme suit :

Bougie nouvelle (unité d'intensité lumineuse). — La grandeur de la bougie nouvelle est telle que la brillance du radiateur intégral à la température de solidification du platine soit de 60 bougies nouvelles par centimètre carré.

Lumen nouveau (unité de flux lumineux). — Le lumen nouveau est le flux lumineux émis dans l'angle solide unité (stéradian) par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 bougie nouvelle.

5. ...

* Les deux définitions contenues dans cette Résolution furent ratifiées par la 9^e CGPM en 1948, qui a en outre approuvé le nom de candela donné à la « bougie nouvelle » (CR, 54). Pour le lumen, le qualificatif « nouveau » a été abandonné par la suite. La définition de la candela a été modifiée par la 13^e CGPM en 1967 (Résolution 5, voir p. 64).

■ Définitions des unités électriques (PV, 20, 132-133)

Résolution 2

...

4. (A) Définitions des unités mécaniques utilisées dans les définitions des unités électriques :

Unité de force. — L'unité de force [dans le système MKS (mètre, kilogramme, seconde)] est la force qui communique à une masse de 1 kilogramme l'accélération de 1 mètre par seconde, par seconde.

Joule (unité d'énergie ou de travail). — Le joule est le travail effectué lorsque le point d'application de 1 unité MKS de force [newton] se déplace d'une distance égale à 1 mètre dans la direction de la force.

Watt (unité de puissance). — Le watt est la puissance qui donne lieu à une production d'énergie égale à 1 joule par seconde.

(B) Définitions des unités électriques. Le Comité [international] admet les propositions suivantes définissant la grandeur théorique des unités électriques :

Ampère (unité d'intensité de courant électrique). — 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 2×10^{-7} unité MKS de force [newton] par mètre de longueur.

Volt (unité de différence de potentiel et de force électromotrice). — Le volt est la différence de potentiel électrique qui existe entre deux points d'un fil conducteur transportant un courant constant de 1 ampère, lorsque la puissance dissipée entre ces points est égale à 1 watt.

Ohm (unité de résistance électrique). — L'ohm est la résistance électrique qui existe entre deux points d'un conducteur lorsqu'une différence de potentiel constante de 1 volt, appliquée entre ces deux points, produit, dans ce conducteur, un courant de 1 ampère, ce conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.

Coulomb (unité de quantité d'électricité). — Le coulomb est la quantité d'électricité transportée en 1 seconde par un courant de 1 ampère.

Farad (unité de capacité électrique). — Le farad est la capacité d'un condensateur électrique entre les armatures duquel apparaît une différence de potentiel électrique de 1 volt, lorsqu'il est chargé d'une quantité d'électricité égale à 1 coulomb.

Henry (unité d'inductance électrique). — Le henry est l'inductance électrique d'un circuit fermé dans lequel une force électromotrice de 1 volt est produite lorsque le courant électrique qui parcourt le circuit varie uniformément à raison de 1 ampère par seconde.

Weber (unité de flux magnétique). — Le weber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produirait une force électromotrice de 1 volt, si on l'amenait à zéro en 1 seconde par décroissance uniforme.

Les définitions contenues dans cette Résolution ont été approuvées par la 9^e CGPM en 1948 (CR, 49), qui a en outre adopté le nom newton (Résolution 7) pour l'unité MKS de force.

9^e CGPM, 1948

■ Point triple de l'eau ; échelle thermodynamique à un seul point fixe ; unité de quantité de chaleur (joule) (CR, 55 et 63)

Résolution 3

1. En l'état actuel de la technique, le point triple de l'eau est susceptible de constituer un repère thermométrique avec une précision plus élevée que le point de fusion de la glace.

En conséquence, le Comité consultatif [de thermométrie et calorimétrie] estime que le zéro de l'échelle thermodynamique centésimale doit être défini comme étant la température inférieure de 0,0100 degré à celle du point triple de l'eau pure.

2. Le Comité consultatif [de thermométrie et calorimétrie] admet le principe d'une échelle thermodynamique absolue ne comportant qu'un seul point fixe fondamental, constitué actuellement par le point triple de l'eau pure, dont la température absolue sera fixée ultérieurement.

L'introduction de cette nouvelle échelle n'affecte en rien l'usage de l'Échelle internationale, qui reste l'échelle pratique recommandée.

3. L'unité de quantité de chaleur est le joule.

Note : Il est demandé que les résultats d'expériences calorimétriques soient autant que possible exprimés en joules. Si les expériences ont été faites par comparaison avec un échauffement d'eau (et que, pour une raison quelconque, on ne puisse éviter l'usage de la calorie), tous les renseignements nécessaires pour la conversion en joules doivent être fournis. Il est laissé aux soins du Comité international, après avis du Comité consultatif de thermométrie et calorimétrie, d'établir une table qui présentera les valeurs les plus précises que l'on peut tirer des expériences faites sur la chaleur spécifique de l'eau, en joules par degré.

Une table, établie conformément à cette demande, a été approuvée et publiée par le Comité international en 1950 (PV, 22, 92).

■ Adoption de « degré Celsius » [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) et 9^e CGPM, 1948 (CR, 64)]

Entre les trois termes (« degré centigrade », « degré centésimal », « degré Celsius ») proposés pour désigner le degré de température, le Comité international a choisi « degré Celsius » (PV, 21, 88).

Ce terme est également adopté par la 9^e Conférence générale (CR, 64).

■ Proposition d'établissement d'un système pratique d'unités de mesure (CR, 64)

Résolution 6

La Conférence générale,

considérant

- que le Comité international des poids et mesures a été saisi d'une demande de l'Union internationale de physique le sollicitant d'adopter pour les relations internationales un système pratique international d'unités, recommandant le système MKS et une unité électrique du système pratique absolu, tout en ne recommandant pas que le système CGS soit abandonné par les physiciens ;
- qu'elle-même a reçu du Gouvernement français une demande analogue, accompagnée d'un projet destiné à servir de base de discussion pour l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure ;

charge le Comité international :

- d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays (en offrant effectivement comme base le document français) et de la pousser activement ;
- de centraliser les réponses ;
- et d'émettre des recommandations concernant l'établissement d'un même système pratique d'unités de mesure, susceptible d'être adopté dans tous les pays signataires de la Convention du Mètre.

■ Écriture des symboles d'unités et des nombres (CR, 70)*

Résolution 7

Principes

Les symboles des unités sont exprimés en caractères romains, en général minuscules ; toutefois, si les symboles sont dérivés de noms propres, les caractères romains majuscules sont utilisés. Ces symboles ne sont pas suivis d'un point.

Dans les nombres, la virgule (usage français) ou le point (usage britannique) sont utilisés seulement pour séparer la partie entière des nombres de leur partie décimale. Pour faciliter la lecture, les nombres peuvent être partagés en tranches de trois chiffres : ces tranches ne sont jamais séparées par des points, ni par des virgules.

* La Conférence générale a abrogé un certain nombre de décisions concernant les unités et la terminologie, en particulier celles relatives au micron, au degré absolu et aux noms « degré » et « deg », 13^e CGPM, 1967/68 (Résolutions 7 et 3, voir pp. 65 et 63, respectivement), ainsi qu'au litre, 16^e CGPM, 1979 (Résolution 6, voir p. 69).

Unités	Symboles	Unités	Symboles
• mètre	m	ampère	A
• mètre carré	m ²	volt	V
• mètre cube	m ³	watt	W
• micron	μ	ohm	Ω
• litre	l	coulomb	C
• gramme	g	farad	F
• tonne	t	henry	H
seconde	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dyne	dyn	newton	N
degré Celsius	°C	• candela (bougie nouvelle)	cd
• degré absolu	°K	lux	lx
calorie	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
heure	h		

Remarques

1. Les symboles dont les unités sont précédées d'un point sont ceux qui avaient déjà été antérieurement adoptés par une décision du Comité international.
2. L'unité de volume stère, employée dans le mesurage des bois, aura pour symbole « st » et non plus « s », qui lui avait été précédemment affecté par le Comité international.
3. S'il s'agit, non d'une température, mais d'un intervalle ou d'une différence de température, le mot « degré » doit être écrit en toutes lettres ou par l'abréviation « deg ».

10^e CGPM, 1954**■ Définition de l'échelle thermodynamique de température (CR, 79)*****Résolution 3**

La Dixième Conférence générale des poids et mesures décide de définir l'échelle thermodynamique de température au moyen du point triple de l'eau comme point fixe fondamental, en lui attribuant la température 273,16 degrés Kelvin, exactement.

* La 13^e CGPM en 1967/68 (Résolution 4, voir p. 64) a explicitement défini le kelvin.

■ Définition de l'atmosphère normale (CR, 79)**Résolution 4**

La Dixième Conférence générale des poids et mesures, ayant constaté que la définition de l'atmosphère normale donnée par la Neuvième Conférence générale des poids et mesures dans la définition de l'Échelle internationale de température a laissé penser à quelques physiciens que la validité de cette définition de l'atmosphère normale était limitée aux besoins de la thermométrie de précision,

déclare qu'elle adopte, pour tous les usages, la définition :

1 atmosphère normale = 1 013 250 dynes par centimètre carré,
c'est-à-dire : 101 325 newtons par mètre carré.

■ Système pratique d'unités de mesure (CR, 80)***Résolution 6**

La Dixième Conférence générale des poids et mesures, en exécution du vœu exprimé dans sa Résolution 6 par la Neuvième Conférence générale concernant l'établissement d'un système pratique d'unités de mesure pour les relations internationales,

décide d'adopter comme unités de base de ce système à établir, les unités suivantes :

longueur	mètre
masse	kilogramme
temps	seconde
intensité de courant électrique	ampère
température thermodynamique	degré Kelvin
intensité lumineuse	candela

* Le nom de l'unité de température thermodynamique a été changé en « kelvin » en 1967 par la 13^e CGPM (Résolution 3, voir p. 63).

CIPM, 1956**■ Définition de l'unité de temps (seconde) (PV, 25, 77)*****Résolution 1**

En vertu des pouvoirs que lui a conférés la Dixième Conférence générale des poids et mesures par sa Résolution 5, le Comité international des poids et mesures,

considérant

1. que la Neuvième Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Dublin, 1955) a émis un avis favorable au rattachement de la seconde à l'année tropique,
2. que, selon les décisions de la Huitième Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Rome, 1952), la seconde de temps des éphémérides (T.E.) est la fraction

* Définition abrogée en 1967 par la 13^e CGPM (Résolution 1, voir p. 63).

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 h T.E.,}$$

décide

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,9747$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides. »

■ Système international d'unités (PV, 25, 83)**Résolution 3**

Le Comité international des poids et mesures,

considérant

- la mission dont l'a chargé la Neuvième Conférence générale des poids et mesures par sa Résolution 6 concernant l'établissement d'un système pratique d'unités de mesure susceptible d'être adopté par tous les pays signataires de la Convention du Mètre,
- l'ensemble des documents envoyés par les vingt et un pays qui ont répondu à l'enquête prescrite par la Neuvième Conférence générale des poids et mesures,
- la Résolution 6 de la Dixième Conférence générale des poids et mesures fixant le choix des unités de base du système à établir,

recommande

1. que soit désigné comme « Système international d'unités » le système fondé sur les unités de base adoptées par la Dixième Conférence générale, qui sont :
[Suit la liste des six unités de base avec leur symbole, reproduite dans la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960)].
2. que soient employées les unités de ce système énumérées au tableau suivant, sans préjudice d'autres unités qu'on pourrait ajouter à l'avenir :
[Suit le tableau des unités reproduit dans le paragraphe 4 de la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960)].

11^e CGPM, 1960**■ Définition du mètre (CR, 85)*****Résolution 6**

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que le Prototype international ne définit pas le mètre avec une précision suffisante pour les besoins actuels de la métrologie,
- qu'il est d'autre part désirable d'adopter un étalon naturel et indestructible,

décide

1. Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86.
2. La définition du mètre en vigueur depuis 1889, fondée sur le Prototype international en platine iridié, est abrogée.
3. Le Prototype international du mètre sanctionné par la Première Conférence générale des poids et mesures en 1889 sera conservé au Bureau international des poids et mesures dans les mêmes conditions que celles qui ont été fixées en 1889.

* Définition abrogée en 1983 par la 17^e CGPM (Résolution 1, voir p. 71).

■ Définition de l'unité de temps (seconde) (CR, 86)*

Résolution 9

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- le pouvoir donné par la Dixième Conférence générale des poids et mesures au Comité international des poids et mesures de prendre une décision au sujet de la définition de l'unité fondamentale de temps,
- la décision prise par le Comité international des poids et mesures dans sa session de 1956,

ratifie la définition suivante :

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,9747$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides. »

* Définition abrogée en 1967 par la 13^e CGPM (Résolution 1, voir p. 63).

■ Système international d'unités (CR, 87)*

Résolution 12

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la Résolution 6 de la Dixième Conférence générale des poids et mesures par laquelle elle a adopté les six unités devant servir de base à l'établissement d'un système pratique de mesure pour les relations internationales :

longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
intensité de courant électrique	ampère	A
température thermodynamique	degré Kelvin	°K
intensité lumineuse	candela	cd

- la Résolution 3 adoptée par le Comité international des poids et mesures en 1956,
- les recommandations adoptées par le Comité international des poids et mesures en 1958 concernant l'abréviation du nom de ce système et les préfixes pour la formation des multiples et sous-multiples des unités,

décide

- le système fondé sur les six unités de base ci-dessus est désigné sous le nom de « Système international d'unités » ;
- l'abréviation internationale du nom de ce Système est : SI ;
- les noms des multiples et sous-multiples des unités sont formés au moyen des préfixes suivants :

* La Conférence générale a ultérieurement abrogé certaines de ces décisions et complété la liste des préfixes SI : voir notes ci-dessous.

Le nom et symbole de l'unité de température thermodynamique ont été modifiés par la 13^e CGPM en 1967 (Résolution 3, voir p. 63).

Une septième unité de base, la mole, fut adoptée par la 14^e CGPM en 1971 (Résolution 3, voir p. 67).

Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole	Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
1 000 000 000 000 = 10^{12}	téra	T	0,1 = 10^{-1}	déci	d
1 000 000 000 = 10^9	giga	G	0,01 = 10^{-2}	centi	c
1 000 000 = 10^6	méga	M	0,001 = 10^{-3}	milli	m
1 000 = 10^3	kilo	k	0,000 001 = 10^{-6}	micro	μ
100 = 10^2	hecto	h	0,000 000 001 = 10^{-9}	nano	n
10 = 10^1	déca	da	0,000 000 000 001 = 10^{-12}	pico	p

D'autres préfixes furent adoptés par la 12^e CGPM en 1964 (Résolution 8, voir p. 62), par la 15^e CGPM en 1975 (Résolution 10, voir p. 68) et par la 19^e CGPM en 1991 (Résolution 4, voir p. 75).

4. sont employées dans ce Système les unités ci-dessous, sans préjudice d'autres unités qu'on pourrait ajouter à l'avenir

Unités supplémentaires

angle	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

La 20^e CGPM a abrogé en 1995 la classe des unités supplémentaires dans le SI (Résolution 8, voir p. 75). Ces unités sont maintenant considérées comme des unités dérivées.

Unités dérivées

superficie	mètre carré	m ²	
volume	mètre cube	m ³	
fréquence	hertz	Hz	1/s
masse volumique (densité)	kilogramme par mètre cube	kg/m ³	
vitesse	mètre par seconde	m/s	
vitesse angulaire	radian par seconde	rad/s	
accélération	mètre par seconde carrée	m/s ²	
accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad/s ²	
force	newton	N	kg · m/s ²
pression (tension mécanique)	newton par mètre carré	N/m ²	
viscosité cinématique	mètre carré par seconde	m ² /s	
viscosité dynamique	newton-seconde par mètre carré	N · s/m ²	
travail, énergie, quantité de chaleur	joule	J	N · m
puissance	watt	W	J/s
quantité d'électricité	coulomb	C	A · s
tension électrique, différence de potentiel, force électromotrice	volt	V	W/A
intensité de champ électrique	volt par mètre	V/m	
résistance électrique	ohm	Ω	V/A
capacité électrique	farad	F	A · s/V
flux d'induction magnétique	weber	Wb	V · s
inductance	henry	H	V · s/A
induction magnétique	tesla	T	Wb/m ²
intensité de champ magnétique	ampère par mètre	A/m	
force magnétomotrice	ampère	A	
flux lumineux	lumen	lm	cd · sr
luminance	candela par mètre carré	cd/m ²	
éclairage	lux	lx	lm/m ²

La 13^e CGPM en 1967 (Résolution 6, voir p. 64) a ajouté d'autres unités à cette liste d'unités dérivées, qui, en principe, n'est pas limitative.

■ Décimètre cube et litre (CR, 88)

Résolution 13

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,
considérant

- que le décimètre cube et le litre sont inégaux et différent d'environ 28 millionièmes,

- que les déterminations de grandeurs physiques impliquant des mesures de volume ont une précision de plus en plus élevée, aggravant par là les conséquences d'une confusion possible entre le décimètre cube et le litre,

invite le Comité international des poids et mesures à mettre ce problème à l'étude et à présenter ses conclusions à la Douzième Conférence générale.

CIPM, 1961

■ Décimètre cube et litre (PV, 29, 34)

Recommandation

Le Comité international des poids et mesures recommande que les résultats des mesures précises de volume soient exprimés en unités du Système international et non en litres.

CIPM, 1964

■ Étalons de fréquence (PV, 32, 26 et CR, 93)

Déclaration

Le Comité international des poids et mesures,

habilite par la Résolution 5 de la Douzième Conférence générale des poids et mesures à désigner les étalons atomiques ou moléculaires de fréquence à employer temporairement pour les mesures physiques de temps,

déclare que l'étalon à employer est la transition entre les niveaux hyperfins $F = 4$, $M = 0$ et $F = 3$, $M = 0$ de l'état fondamental $^2S_{1/2}$ de l'atome de césium 133 non perturbé par des champs extérieurs, et que la valeur 9 192 631 770 hertz est assignée à la fréquence de cette transition.

12^e CGPM, 1964

■ Étalon atomique de fréquence (CR, 93)

Résolution 5

La Douzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que la Onzième Conférence générale des poids et mesures a constaté dans sa Résolution 10 l'urgence pour les buts de la haute métrologie d'arriver à un étalon atomique ou moléculaire d'intervalle de temps,
- que, malgré les résultats acquis dans l'utilisation des étalons atomiques de fréquence à césium, le moment n'est pas encore venu pour la Conférence générale d'adopter une nouvelle définition de la seconde, unité de base du Système international d'unités, en raison des progrès nouveaux et importants qui peuvent être obtenus à la suite des études en cours,

considérant aussi qu'on ne peut pas attendre davantage pour fonder les mesures physiques de temps sur des étalons atomiques ou moléculaires de fréquence,

habilite le Comité international des poids et mesures à désigner les étalons atomiques ou moléculaires de fréquence à employer temporairement,

invite les Organisations et les Laboratoires experts dans ce domaine à poursuivre les études utiles à une nouvelle définition de la seconde.

■ Litre (CR, 93)

Résolution 6

La Douzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant la Résolution 13 adoptée par la Onzième Conférence générale en 1960 et la Recommandation adoptée par le Comité international des poids et mesures à sa session de 1961,

1. **abroge** la définition du litre donnée en 1901 par la Troisième Conférence générale des poids et mesures,
2. **déclare** que le mot « litre » peut être utilisé comme un nom spécial donné au décimètre cube,
3. **recommande** que le nom de litre ne soit pas utilisé pour exprimer les résultats des mesures de volume de haute précision.

■ Curie (CR, 94)*

Résolution 7

La Douzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant que depuis longtemps le curie est utilisé dans beaucoup de pays comme unité pour l'activité des radionucléides,

reconnaissant que dans le Système international d'unités (SI), l'unité de cette activité est la seconde à la puissance moins un (s^{-1}),

admet que le curie soit encore retenu comme unité en dehors du SI pour l'activité, avec la valeur $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$. Le symbole de cette unité est Ci.

* Le nom « becquerel » (Bq) a été adopté par la 15^e CGPM en 1975 (Résolution 8, voir p. 68) pour l'unité SI d'activité : $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

■ Préfixes SI femto et atto (CR, 94)*

Résolution 8

La Douzième Conférence générale des poids et mesures,

décide d'ajouter à la liste des préfixes pour la formation des noms des multiples et des sous-multiples des unités, adoptée par la Onzième Conférence générale, Résolution 12, paragraphe 3, les deux nouveaux préfixes suivants :

Facteur par lequel
l'unité est multipliée

Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

* De nouveaux préfixes furent ajoutés par la 15^e CGPM en 1975 (Résolution 10, voir p. 68).

CIPM, 1967

■ Multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse (PV, 35, 29 et *Metrologia*, 1968, 4, 45)

Recommandation 2

Le Comité international des poids et mesures,

considérant que la règle de formation des noms des multiples et sous-multiples décimaux des unités du paragraphe 3 de la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale des poids et mesures (1960) peut prêter à des interprétations divergentes dans son application à l'unité de masse,

déclare que les dispositions de la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale s'appliquent dans le cas du kilogramme de la façon suivante : les noms des multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse sont formés par l'adjonction des préfixes au mot « gramme ».

13^e CGPM, 1967/68

■ Unité SI de temps (seconde) (CR, 103 et *Metrologia*, 1968, 4, 43)

Résolution 1

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que la définition de la seconde décidée par le Comité international des poids et mesures à sa session de 1956 (Résolution 1) et ratifiée par la Résolution 9 de la Onzième Conférence générale (1960), puis maintenue par la Résolution 5 de la Douzième Conférence générale (1964) ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie,
- qu'à sa session de 1964 le Comité international des poids et mesures, habilité par la Résolution 5 de la Douzième Conférence (1964), a désigné pour répondre à ces besoins un étalon atomique de fréquence à césium à employer temporairement,
- que cet étalon de fréquence est maintenant suffisamment éprouvé et suffisamment précis pour servir à une définition de la seconde répondant aux besoins actuels,
- que le moment est venu de remplacer la définition actuellement en vigueur de l'unité de temps du Système international d'unités par une définition atomique fondée sur cet étalon,

décide

1. L'unité de temps du Système international d'unités est la seconde définie dans les termes suivants :
« 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 ».
2. La Résolution 1 adoptée par le Comité international des poids et mesures à sa session de 1956 et la Résolution 9 de la Onzième Conférence générale des poids et mesures sont abrogées.

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.

■ Unité SI de température thermodynamique (kelvin) (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43)*

Résolution 3

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- les noms « degré Kelvin » et « degré », les symboles « °K » et « deg » et leurs règles d'emploi contenus dans la Résolution 7 de la Neuvième Conférence générale (1948), dans la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale (1960) et la décision prise par le Comité international des poids et mesures en 1962 (PV, 30, 27),
- que l'unité de température thermodynamique et l'unité d'intervalle de température sont une même unité qui devrait être désignée par un nom unique et par un symbole unique,

* À sa session de 1980, le Comité international a approuvé le rapport de la 7^e session du CCU demandant que l'emploi des symboles « °K » et « deg » ne soit plus admis.

décide

1. l'unité de température thermodynamique est désignée sous le nom « kelvin » et son symbole est « K » ;*
2. ce même nom et ce même symbole sont utilisés pour exprimer un intervalle de température ;
3. un intervalle de température peut aussi s'exprimer en degrés Celsius ;
4. les décisions mentionnées au premier considérant concernant le nom de l'unité de température thermodynamique, son symbole et la désignation de l'unité pour exprimer un intervalle ou une différence de température sont abrogées, mais les usages qui sont la conséquence de ces décisions restent admis temporairement.

* Voir la Recommandation 2 (CI-2005) du CIPM relative à la composition isotopique de l'eau entrant dans la définition du kelvin (p. 81).

■ Définition de l'unité SI de température thermodynamique (kelvin) (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43)*

Résolution 4

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant qu'il est utile de formuler dans une rédaction explicite la définition de l'unité de température thermodynamique contenue dans la Résolution 3 de la Dixième Conférence générale (1954),

décide d'exprimer cette définition de la façon suivante :

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

* Voir la Recommandation 5 (CI-1989) du CIPM relative à l'Échelle internationale de température de 1990 (p. 74).

■ Unité SI d'intensité lumineuse (candela) (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)*

Résolution 5

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- la définition de l'unité d'intensité lumineuse ratifiée par la Neuvième Conférence générale (1948) et contenue dans la « Résolution concernant le changement des unités photométriques » adoptée par le Comité international des poids et mesures en 1946 (PV, 20, 119) en vertu des pouvoirs conférés par la Huitième Conférence générale (1933),
- que cette définition fixe bien la grandeur de l'unité d'intensité lumineuse mais prête à des critiques d'ordre rédactionnel,

décide d'exprimer la définition de la candela de la façon suivante :

« La candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de $1/600\,000$ mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de 101 325 newtons par mètre carré. »

* Définition abrogée en 1979 par la 16^e CGPM (Résolution 3, voir p. 68).

■ Unités SI dérivées (CR, 105 et *Metrologia*, 1968, 4, 44)*

Résolution 6

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant qu'il est utile de citer d'autres unités dérivées dans la liste du paragraphe 4 de la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale (1960),

* L'unité d'activité a reçu un nom spécial et un symbole particulier lors de la 15^e CGPM en 1975 (Résolution 8, voir p. 68).

décide d'y ajouter:

nombre d'ondes	1 par mètre	m^{-1}
entropie	joule par kelvin	J/K
chaleur massique	joule par kilogramme kelvin	J/(kg · K)
conductivité thermique	watt par mètre kelvin	W/(m · K)
intensité énergétique	watt par stéradian	W/sr
activité (d'une source radioactive)	1 par seconde	s^{-1}

■ **Abrogation de décisions antérieures (micron et bougie nouvelle)** (CR, 105 et *Metrologia*, 1968, 4, 44)

Résolution 7

La Treizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant que les décisions prises ultérieurement par la Conférence générale concernant le Système international d'unités contredisent quelques parties de la Résolution 7 de la Neuvième Conférence générale (1948),

décide en conséquence de retirer de la Résolution 7 de la Neuvième Conférence :

1. le nom d'unité « micron », et le symbole « μ » qui fut attribué à cette unité et qui est devenu un préfixe ;
2. le nom d'unité « bougie nouvelle ».

CIPM, 1969

■ **Système international d'unités, modalités d'application de la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960)** (PV, 37, 30 et *Metrologia*, 1970, 6, 66)*

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures,

considérant que la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale des poids et mesures (1960), concernant le Système international d'unités, a suscité des discussions sur certaines dénominations,

déclare

1. les unités de base, les unités supplémentaires et les unités dérivées du Système international d'unités, qui forment un ensemble cohérent, sont désignées sous le nom d'« unités SI » ;**
2. les préfixes adoptés par la Conférence générale pour la formation des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI sont appelés « préfixes SI » ;

et recommande

3. d'employer les unités SI et leurs multiples et sous-multiples décimaux dont les noms sont formés au moyen des préfixes SI.

Note : L'appellation « unités supplémentaires », figurant dans la Résolution 12 de la Onzième Conférence générale des poids et mesures (et dans la présente Recommandation), est donnée aux unités SI pour lesquelles la Conférence générale ne décide pas s'il s'agit d'unités de base ou bien d'unités dérivées.

* La 20^e CGPM a décidé d'abroger en 1995 (Résolution 8, voir p. 75) la classe des unités supplémentaires dans le SI.

** Le CIPM a approuvé en 2001 une proposition du CCU visant à clarifier la définition des « unités SI » et « unités du SI », voir p. 77.

CCDS, 1970 (In CIPM, 1970)**■ Définition du TAI (PV, 38, 110-111 et *Metrologia*, 1971, 7, 43)****Recommandation S 2**

Le Temps atomique international est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau international de l'heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système international d'unités.

En 1980, la définition du TAI a été complétée comme suit (déclaration du CCDS, *BIPM Com. cons. déf. seconde*, 1980, 9, S 15 et *Metrologia*, 1981, 17, 70) :

Le TAI est une échelle de temps-coordonnée définie dans un repère de référence géocentrique avec comme unité d'échelle la seconde du SI telle qu'elle est réalisée sur le géoïde en rotation.

L'Union astronomique internationale a précisé cette définition dans sa Résolution A4 de 1991 : « Le TAI est une échelle de temps réalisée dont la forme idéale, si l'on néglige un décalage constant de 32,184 s, est le Temps terrestre (TT), lui-même relié à la coordonnée temps du référentiel géocentrique, le Temps-coordonnée géocentrique (TCG), par une marche constante. » (voir Proc. 21st General Assembly of the IAU, *IAU Trans.*, 1991, vol. XXIB, Kluwer.)

14^e CGPM, 1971**■ Pascal et siemens (CR, 78)**

La 14^e Conférence générale a adopté les noms spéciaux « pascal » (symbole Pa) pour l'unité SI newton par mètre carré et « siemens » (symbole S) pour l'unité SI de conductance électrique (ohm à la puissance moins un).

■ Temps atomique international ; rôle du CIPM (CR, 77-78 et *Metrologia*, 1972, 8, 35)**Résolution 1**

La Quatorzième Conférence générale des poids et mesures, **considérant**

- que la seconde, unité de temps du Système international d'unités, est définie depuis 1967 d'après une fréquence atomique naturelle, et non plus d'après des échelles de temps fournies par des mouvements astronomiques,
- que le besoin d'une échelle de Temps atomique international (TAI) est une conséquence de la définition atomique de la seconde,
- que plusieurs organisations internationales ont assuré et assurent encore avec succès l'établissement des échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques, particulièrement grâce aux services permanents du Bureau international de l'heure (BIH),
- que le Bureau international de l'heure a commencé à établir une échelle de temps atomique dont les qualités sont reconnues et qui a prouvé son utilité,
- que les étalons atomiques de fréquence servant à la réalisation de la seconde ont été considérés et doivent continuer de l'être par le Comité international des poids et mesures assisté d'un Comité consultatif, et que l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps atomique international doit être la seconde réalisée conformément à sa définition atomique,
- que toutes les organisations scientifiques internationales compétentes et les laboratoires nationaux actifs dans ce domaine ont exprimé le désir que le Comité international et la Conférence générale des poids et mesures donnent une définition du Temps atomique international, et contribuent à l'établissement de l'échelle de Temps atomique international,
- que l'utilité du Temps atomique international nécessite une coordination étroite avec les échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques,

demande au Comité international des poids et mesures

1. de donner une définition du Temps atomique international ;
2. de prendre les mesures nécessaires, en accord avec les organisations internationales intéressées, pour que les compétences scientifiques et les moyens d'action existants soient utilisés au mieux pour la réalisation de l'échelle de Temps atomique international, et pour que soient satisfaits les besoins des utilisateurs du Temps atomique international.

La définition du TAI a été donnée par le CCDS en 1970 (maintenant renommé CCTF), voir p. 66.

■ Unité SI de quantité de matière (mole) (CR, 78 et *Metrologia*, 1972, 8, 36)*

Résolution 3

La Quatorzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant les avis de l'Union internationale de physique pure et appliquée, de l'Union internationale de chimie pure et appliquée et de l'Organisation internationale de normalisation concernant le besoin de définir une unité de quantité de matière,

décide

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 ; son symbole est « mol ».
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.
3. La mole est une unité de base du Système international d'unités.

* À sa session de 1980, le CIPM a approuvé le rapport de la 7^e session du CCU (1980) précisant que, 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.

15^e CGPM, 1975

■ Valeur recommandée pour la vitesse de la lumière (CR, 103 et *Metrologia*, 1975, 11, 179-180)

Résolution 2

La Quinzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant l'excellent accord entre les résultats des mesures de longueur d'onde portant sur des radiations de lasers asservis sur une raie d'absorption moléculaire dans la région visible ou infrarouge, avec une incertitude estimée à $\pm 4 \times 10^{-9}$ qui correspond à l'indétermination de la réalisation du mètre,

considérant aussi les mesures concordantes de la fréquence de plusieurs de ces radiations,

recommande l'emploi de la valeur qui en résulte pour la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide $c = 299\,792\,458$ mètres par seconde.

L'incertitude relative doit être comprise comme étant trois fois l'incertitude-type estimée sur les résultats considérés.

■ Temps universel coordonné (UTC) (CR, 104 et *Metrologia*, 1975, 11, 180)

Résolution 5

La Quinzième Conférence générale des poids et mesures,

considérant que le système appelé « Temps universel coordonné » (UTC) est employé très largement, qu'il est diffusé par la plupart des émetteurs hertziens de signaux horaires, que sa diffusion fournit aux utilisateurs à la fois des fréquences étalons, le Temps atomique international et une approximation du Temps universel (ou, si l'on préfère, du temps solaire moyen),

constate que ce Temps universel coordonné est à la base du temps civil dont l'usage est légal dans la plupart des pays,

estime que cet emploi est parfaitement recommandable.

■ Unités SI pour les rayonnements ionisants (becquerel et gray) (CR, 105 et *Metrologia*, 1975, 11, 180)*

Résolutions 8 et 9

La Quinzième Conférence générale des poids et mesures,

en raison de l'urgence, exprimée par la Commission internationale des unités et mesures de rayonnements (ICRU), d'étendre l'usage du Système international d'unités aux recherches et aux applications de la radiologie,

en raison de la nécessité de rendre aussi simple que possible l'usage des unités aux non-spécialistes,

tenant compte aussi de la gravité des risques d'erreurs dans la thérapeutique,

adopte le nom spécial suivant d'unité SI pour l'activité :

le **becquerel**, symbole Bq, égal à la seconde à la puissance moins un (Résolution 8),

adopte le nom spécial suivant d'unité SI pour les rayonnements ionisants :

le **gray**, symbole Gy, égal au joule par kilogramme (Résolution 9).

Note : Le gray est l'unité SI de dose absorbée. Dans le domaine des rayonnements ionisants, le gray peut encore être employé avec d'autres grandeurs physiques qui s'expriment aussi en joules par kilogramme ; le Comité consultatif des unités est chargé d'étudier cette question en collaboration avec les organisations internationales compétentes.

* À sa session de 1976, le Comité international a approuvé le rapport de la 5^e session du CCU (1976) précisant que, suivant l'avis de l'ICRU, le gray peut être employé aussi pour exprimer l'énergie communiquée massique, le kerma et l'indice de dose absorbée.

■ Préfixes SI péta et exa (CR, 106 et *Metrologia*, 1975, 11, 180-181)*

Résolution 10

La Quinzième Conférence générale des poids et mesures,

décide d'ajouter à la liste des préfixes SI pour la formation des noms des multiples des unités, adoptée par la Onzième Conférence générale, Résolution 12, paragraphe 3, les deux préfixes suivants :

Facteur par lequel

l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10^{15}	peta	P
10^{18}	exa	E

* De nouveaux préfixes furent ajoutés en 1991 par la 19^e CGPM (Résolution 4, voir p. 75).

En français, il est d'usage courant de mettre un accent à péta.

16^e CGPM, 1979

■ Unité SI d'intensité lumineuse (candela) (CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56)

Résolution 3

La Seizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que, malgré les efforts méritoires de quelques laboratoires, il subsiste des divergences excessives entre les résultats de la réalisation de la candela à l'aide du corps noir étalon primaire actuel,

- que les techniques radiométriques se développent rapidement, autorisant des précisions qui sont déjà analogues à celles de la photométrie et que ces techniques sont déjà en usage dans des laboratoires nationaux pour réaliser la candela sans avoir à construire un corps noir,
- que la relation entre les grandeurs lumineuses de la photométrie et les grandeurs énergétiques, à savoir la valeur 683 lumens par watt pour l'efficacité lumineuse spectrale de la radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz, a été adoptée par le Comité international des poids et mesures en 1977,
- que cette valeur a été reconnue suffisamment exacte pour le système des grandeurs lumineuses photopiques, qu'elle n'entraîne qu'un changement d'environ 3 % pour le système des grandeurs lumineuses scotopiques et que par conséquent elle assure une continuité satisfaisante,
- que le moment est venu de donner à la candela une définition susceptible d'améliorer la facilité d'établissement des étalons photométriques et leur précision, et qui s'applique aux grandeurs photopiques et scotopiques de la photométrie et aux grandeurs à définir dans le domaine mésopique,

décide

1. La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.
2. La définition de la candela (à l'époque appelée bougie nouvelle) décidée par le Comité international des poids et mesures en 1946 en vertu des pouvoirs conférés par la 8^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1933, ratifiée par la 9^e CGPM en 1948, puis amendée par la 13^e CGPM en 1967, est abrogée.

■ **Nom spécial pour l'unité SI d'équivalent de dose (sievert)** (CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56)*

Résolution 5

La Seizième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'effort fait pour introduire les unités SI dans le domaine des rayonnements ionisants,
- les risques que peuvent encourir des êtres humains soumis à des irradiations sous-estimées, risques qui pourraient résulter de la confusion entre dose absorbée et équivalent de dose,
- que la prolifération des noms spéciaux représente un danger pour le Système international d'unités et doit être évitée dans toute la mesure du possible, mais que cette règle peut être transgressée lorsqu'il s'agit de sauvegarder la santé humaine,

adopte le nom spécial **sievert**, symbole Sv, pour l'unité SI d'équivalent de dose dans le domaine de la radioprotection. Le sievert est égal au joule par kilogramme.

■ **Symboles du litre** (CR, 101 et *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

Résolution 6

La Seizième Conférence générale des poids et mesures,

reconnaissant les principes généraux adoptés pour l'écriture des symboles des unités dans la Résolution 7 de la 9^e Conférence générale des poids et mesures (1948),

considérant que le symbole l pour l'unité litre a été adopté par le Comité international des poids et mesures en 1879 et confirmé dans cette même Résolution de 1948,

La vision photopique est détectée sur la rétine de l'œil par les cônes, sensibles aux luminances élevées ($L > \text{environ } 10 \text{ cd m}^{-2}$), qui correspondent à la vision diurne. La vision scotopique est détectée sur la rétine de l'œil par les bâtonnets, sensibles aux faibles luminances ($L < \text{environ } 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$), qui correspondent à la vision nocturne. Dans le cas de luminances intermédiaires entre la vision photopique et la vision scotopique, les cônes et les bâtonnets fonctionnent simultanément, on est alors dans le domaine de la vision mésopique.

* Le Comité international a décidé en 1984 d'accompagner cette Résolution d'une explication, (Recommandation 1, voir p. 72).

considérant aussi que, afin d'éviter un risque de confusion entre la lettre l et le chiffre 1, plusieurs pays ont adopté le symbole L au lieu de l pour l'unité litre,

considérant que le nom litre, bien qu'il ne soit pas inclus dans le Système international d'unités, doit être admis pour l'usage général avec ce Système,

décide, à titre exceptionnel, d'adopter les deux symboles l et L comme symboles utilisables pour l'unité litre,

considérant en outre que dans l'avenir un seul des deux symboles devrait être retenu,

invite le Comité international des poids et mesures à suivre le développement de l'usage des deux symboles et à donner à la 18^e Conférence générale des poids et mesures son avis sur la possibilité de supprimer l'un d'eux.

Le Comité international a estimé encore prématuré, en 1990, de choisir un symbole unique du litre.

CIPM, 1980

■ **Unités SI supplémentaires (radian et stéradian)** (PV, 48, 24 et *Metrologia*, 1981, 17, 72)*

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

prenant en considération la Résolution 3 adoptée par l'ISO/TC 12 en 1978 et la Recommandation U 1 (1980) adoptée par le Comité consultatif des unités (CCU) à sa 7^e session,

considérant

- que les unités radian et stéradian sont introduites usuellement dans des expressions des unités pour des besoins de clarification, notamment en photométrie où le stéradian joue un rôle important pour distinguer les unités correspondant aux diverses grandeurs,
- que dans les équations utilisées on exprime généralement l'angle plan comme le rapport entre deux longueurs et l'angle solide comme le rapport entre une aire et le carré d'une longueur, et que par conséquent ces grandeurs sont traitées comme des grandeurs sans dimension,
- que l'étude des formalismes en usage dans le domaine scientifique montre qu'il n'en existe aucun qui soit à la fois cohérent et convenable, et dans lequel les grandeurs angle plan et angle solide soient considérées comme des grandeurs de base,

considérant aussi

- que l'interprétation donnée par le CIPM en 1969 pour la classe des unités supplémentaires introduite dans la Résolution 12 de la 11^e Conférence générale des poids et mesures en 1960 laisse la liberté de traiter le radian et le stéradian comme unités de base dans le Système international,
- qu'une telle possibilité compromet la cohérence interne du Système international fondé sur sept unités de base seulement,

décide d'interpréter la classe des unités supplémentaires dans le Système international comme une classe d'unités dérivées sans dimension pour lesquelles la Conférence générale des poids et mesures laisse la liberté de les utiliser ou non dans les expressions des unités dérivées du Système international.

* La classe des unités supplémentaires dans le SI a été abrogée en 1995 par décision de la 20^e CGPM (Résolution 8, voir p. 75).

17^e CGPM, 1983■ Définition du mètre (CR, 97 et *Metrologia*, 1984, 20, 25)

Résolution 1

La Dix-septième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que la définition actuelle ne permet pas une réalisation du mètre suffisamment précise pour tous les besoins,
- que les progrès réalisés dans l'asservissement des lasers permettent d'obtenir des radiations plus reproductibles et plus faciles à utiliser que la radiation étalon émise par une lampe à krypton 86,
- que les progrès réalisés dans la mesure des fréquences et des longueurs d'onde de ces radiations ont abouti à des déterminations concordantes de la vitesse de la lumière dont l'exactitude est limitée principalement par la réalisation du mètre dans sa définition actuelle,
- que les valeurs des longueurs d'onde déterminées à partir de mesures de fréquence et d'une valeur donnée de la vitesse de la lumière ont une précision supérieure à celle qui peut être obtenue par comparaison avec la longueur d'onde de la radiation étalon du krypton 86,
- qu'il y a avantage, notamment pour l'astronomie et la géodésie, à maintenir inchangée la valeur de la vitesse de la lumière recommandée en 1975 par la 15^e Conférence générale des poids et mesures, dans sa Résolution 2 ($c = 299\,792\,458$ m/s),
- qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour effet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à la valeur recommandée, et que cela n'introduit aucune discontinuité appréciable de l'unité de longueur, compte tenu de l'incertitude relative de $\pm 4 \times 10^{-9}$ des meilleures réalisations du mètre dans sa définition actuelle.
- que ces diverses formes, faisant appel soit au trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps spécifié, soit à la longueur d'onde d'une radiation de fréquence mesurée ou de fréquence spécifiée, ont fait l'objet de consultations et de discussions approfondies, qu'elles ont été reconnues équivalentes et qu'un consensus s'est dégagé en faveur de la première forme,
- que le Comité consultatif pour la définition du mètre est dès maintenant en mesure de donner des instructions pour la mise en pratique d'une telle définition, instructions qui pourront inclure l'emploi de la radiation orangée du krypton 86 utilisée jusqu'ici comme étalon et qui pourront être complétées ou révisées par la suite,

La valeur de l'incertitude donnée ici correspond à trois fois l'écart-type de la valeur en question.

décide

1. Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde.
2. La définition du mètre en vigueur depuis 1960, fondée sur la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86, est abrogée.

■ Sur la mise en pratique de la définition du mètre (CR, 98 et *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)

Résolution 2

La Dix-septième Conférence générale des poids et mesures

invite le Comité international des poids et mesures

- à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre,

Voir Recommandation 1 (CI-2002) du CIPM relative à la révision de la mise en pratique de la définition du mètre, p. 77.

- à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
- à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons.

CIPM, 1984

■ Au sujet du sievert (PV, 52, 31 et *Metrologia*, 1985, 21, 90)*

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures,

considérant la confusion qui continue d'exister au sujet de la Résolution 5, votée par la 16^e Conférence générale des poids et mesures (1979),

décide d'introduire l'explication suivante dans la Brochure « Le Système international d'unités (SI) » :

La grandeur équivalent de dose H est le produit de la dose absorbée D de rayonnements ionisants et de deux facteurs sans dimension Q (facteur de qualité) et N (produit de tous les autres facteurs de multiplication) prescrits par l'International Commission on Radiological Protection :

$$H = Q \cdot N \cdot D.$$

Ainsi, pour une radiation donnée, la valeur numérique de H en joules par kilogramme peut être différente de la valeur numérique de D en joules par kilogramme, puisqu'elle est fonction de la valeur de Q et de N . Afin d'éviter tout risque de confusion entre la dose absorbée D et l'équivalent de dose H , il faut employer les noms spéciaux pour les unités correspondantes, c'est-à-dire qu'il faut utiliser le nom gray au lieu de joule par kilogramme pour l'unité de dose absorbée D et le nom sievert au lieu de joule par kilogramme pour l'unité d'équivalent de dose H .

* Le CIPM a décidé en 2002 de modifier les explications sur la grandeur équivalent de dose dans la Brochure sur le SI (Recommandation 2 (CI-2002), voir p. 79).

18^e CGPM, 1987

■ Ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm (CR, 100 et *Metrologia*, 1988, 25, 115)

Résolution 6

La Dix-huitième Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que l'uniformité mondiale et la constance à long terme des représentations nationales des unités électriques sont d'une importance majeure pour la science, le commerce et l'industrie du point de vue technique comme du point de vue économique,
- que de nombreux laboratoires nationaux utilisent l'effet Josephson et commencent à utiliser l'effet Hall quantique pour conserver respectivement des représentations du volt et de l'ohm qui donnent les meilleures garanties de stabilité à long terme,
- qu'en raison de l'importance de la cohérence entre les unités de mesure des diverses grandeurs physiques les valeurs attribuées à ces représentations doivent être autant que possible en accord avec le SI,
- que l'ensemble des résultats des expériences en cours ou récemment achevées permettra d'établir une valeur acceptable, suffisamment compatible avec le SI, pour le coefficient qui relie chacun de ces effets à l'unité électrique correspondante,

invite les laboratoires dont les travaux peuvent contribuer à établir la valeur du quotient de la tension par la fréquence dans l'effet Josephson et de la tension par le courant dans l'effet Hall quantique à poursuivre activement ces travaux et à communiquer sans délai leurs résultats au Comité international des poids et mesures et,

charge le Comité international des poids et mesures de recommander, dès qu'il le jugera possible, une valeur de chacun de ces quotients et une date à laquelle elle pourra être mise en pratique simultanément dans tous les pays ; cette valeur devrait être annoncée au moins un an à l'avance et pourrait être adoptée au 1^{er} janvier 1990.

CIPM, 1988

■ **Représentation du volt au moyen de l'effet Josephson** (PV, 56, 19 et *Metrologia*, 1989, 26, 69)

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures

agissant conformément aux instructions données dans la Résolution 6 de la 18^e Conférence générale des poids et mesures concernant l'ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm,

considérant

- qu'une étude approfondie des résultats des déterminations les plus récentes conduit à une valeur de 483 597,9 GHz/V pour la constante de Josephson, K_J , c'est-à-dire pour le quotient de la fréquence par la tension correspondant au palier de rang $n = 1$ dans l'effet Josephson,
- que l'effet Josephson, avec cette valeur de K_J , peut être utilisé pour établir un étalon de référence de force électromotrice dont l'incertitude (écart-type), par rapport au volt, est estimée à 4×10^{-7} en valeur relative et dont la reproductibilité est nettement meilleure,

recommande

- que l'on adopte, par convention, pour la constante de Josephson, K_J , la valeur $K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V exactement,
- que cette nouvelle valeur soit utilisée à partir du 1^{er} janvier 1990, et non auparavant, pour remplacer les valeurs actuellement en usage,
- que cette nouvelle valeur soit utilisée à partir de cette même date par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Josephson leurs mesures de force électromotrice,
- qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec cette nouvelle valeur,

estime qu'aucun changement de cette valeur recommandée de la constante de Josephson ne sera nécessaire dans un avenir prévisible,

attire l'attention des laboratoires sur le fait que la nouvelle valeur est supérieure de 3,9 GHz/V, soit approximativement 8×10^{-6} en valeur relative, à la valeur donnée en 1972 par le Comité consultatif d'électricité dans sa Déclaration E-72.

■ **Représentation de l'ohm au moyen de l'effet Hall quantique** (PV, 56, 20 et *Metrologia*, 1989, 26, 70)

Recommandation 2

Le Comité international des poids et mesures,

agissant conformément aux instructions données dans la Résolution 6 de la 18^e Conférence générale des poids et mesures concernant l'ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm,

considérant

- que la plupart des étalons actuels de référence de résistance électrique présentent au cours du temps des variations significatives,
- qu'un étalon de référence de résistance électrique fondé sur l'effet Hall quantique serait stable et reproductible,
- qu'une étude approfondie des résultats des déterminations les plus récentes conduit à une valeur de 25 812,807 Ω pour la constante de von Klitzing, R_K , c'est-à-dire pour le quotient de la tension de Hall par le courant correspondant au plateau de rang $i = 1$ dans l'effet Hall quantique,
- que l'effet Hall quantique, avec cette valeur de R_K , peut être utilisé pour établir un étalon de référence de résistance dont l'incertitude (écart-type), par rapport à l'ohm, est estimée 2×10^{-7} en valeur relative et dont la reproductibilité est nettement meilleure,

recommande

- que l'on adopte par convention, pour la constante de von Klitzing, R_K , la valeur $R_{K-90} = 25\,812,807\,\Omega$ exactement,
- que cette valeur soit utilisée à partir du 1^{er} janvier 1990, et non auparavant, par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Hall quantique leurs mesures de résistance électrique,
- qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec R_{K-90} ,
- que, pour établir un étalon de référence de résistance électrique fondé sur l'effet Hall quantique, les laboratoires suivent les conseils pour la mise en oeuvre de la résistance de Hall quantifiée élaborés par le Comité consultatif d'électricité et publiés par les soins du Bureau international des poids et mesures, dans leur édition la plus récente,

et estime qu'aucun changement de cette valeur recommandée de la constante de von Klitzing ne sera nécessaire dans un avenir prévisible.

Lors de sa 89^e session en 2000, le CIPM a approuvé la déclaration de la 22^e session du CCEM concernant la valeur de la constante de von Klitzing, voir p. 77.

CIPM, 1989

■ **L'Échelle internationale de température de 1990** (PV, 57, 26 et *Metrologia*, 1990, 27, 13)

Recommandation 5

Le Comité international des poids et mesures (CIPM), conformément à l'invitation formulée par la 18^e Conférence générale des poids et mesures en 1987 (Résolution 7), a adopté l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) en remplacement de l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68).

Le CIPM **souligne** que, par rapport à l'EIP-68, l'EIT-90

- s'étend vers des températures plus basses, jusqu'à 0,65 K, et remplace, de ce fait, aussi l'Échelle provisoire de température de 1976 (EPT-76),
- est en bien meilleur accord avec les températures thermodynamiques correspondantes,

- a une continuité, une précision et une reproductibilité nettement améliorées sur toute son étendue,
- comporte des sous-domaines et donne, dans certains domaines, des définitions équivalentes qui facilitent grandement son utilisation.

Le CIPM **note** de plus, que le texte de l'EIT-90 sera accompagné de deux documents, *Supplementary Information for the ITS-90* et *Techniques for Approximating the ITS-90*, qui seront publiés par le Bureau international des poids et mesures et remis à jour périodiquement.

Le CIPM **recommande**

- que l'EIT-90 soit mise en application le 1^{er} janvier 1990,
- et que, à la même date, l'EIP-68 et l'EPT-76 soient abrogées.

19^e CGPM, 1991

■ Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto (CR, 97 et *Metrologia*, 1992, 29, 3)

Résolution 4

La 19^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM),

décide d'ajouter à la liste des préfixes SI pour la formation des noms des multiples et sous-multiples des unités, adoptée par la 11^e CGPM, Résolution 12, paragraphe 3, la 12^e CGPM, Résolution 8 et la 15^e CGPM, Résolution 10, les préfixes suivants :

Facteur par lequel

l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10^{21}	zetta	Z
10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y
10^{-24}	yocto	y

Les noms zepto et zetta évoquent le chiffre sept (septième puissance de 10^3) et la lettre « z » remplace la lettre « s » pour éviter le double emploi de la lettre « s » comme symbole. Les noms yocto et yotta sont dérivés de octo, qui évoque le chiffre huit (huitième puissance de 10^3) ; la lettre « y » est ajoutée pour éviter l'emploi de la lettre « o » comme symbole à cause de la confusion possible avec le chiffre zéro.

20^e CGPM, 1995

■ Suppression de la classe des unités supplémentaires dans le SI (CR, 121 et *Metrologia*, 1996, 33, 83)

Résolution 8

La 20^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que la 11^e Conférence générale, en 1960, dans sa Résolution 12 établissant le Système international d'unités, SI, a distingué trois classes d'unités, celle des unités de base, celle des unités dérivées et celle des unités supplémentaires, cette dernière comprenant seulement le radian et le stéradian,
- que le statut des unités supplémentaires par rapport aux unités de base et aux unités dérivées, a donné lieu à des discussions,
- que le Comité international des poids et mesures (CIPM), en 1980, constatant que le statut ambigu des unités supplémentaires compromet la cohérence interne du SI, a interprété dans sa Recommandation 1 (CI-1980) les unités supplémentaires, dans le SI, comme des unités dérivées sans dimension,

approuvant l'interprétation donnée par le CIPM en 1980,

décide

- d'interpréter les unités supplémentaires, dans le SI, c'est-à-dire le radian et le stéradian, comme des unités dérivées sans dimension dont les noms et les symboles peuvent être utilisés, mais pas nécessairement, dans les expressions d'autres unités dérivées SI, suivant les besoins,
- et, par conséquent, de supprimer la classe des unités supplémentaires en tant que classe séparée dans le SI.

21^e CGPM, 1999**■ La définition du kilogramme (CR, 141-142 et *Metrologia*, 2000, 37, 94)****Résolution 7**

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- le besoin d'assurer la stabilité à long terme du Système international d'unités (SI),
- l'incertitude intrinsèque relative à la stabilité à long terme du prototype qui sert à définir l'unité de masse, l'une des unités de base du SI,
- que cette incertitude se répercute sur la stabilité à long terme des trois autres unités de base du SI, nommément l'ampère, la mole et la candela, dont la définition dépend de celle du kilogramme,
- les progrès déjà obtenus dans différentes expériences destinées à relier l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques,
- qu'il est souhaitable de disposer de plusieurs méthodes pour réaliser ce lien,

recommande que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour affiner les expériences qui relient l'unité de masse à des constantes fondamentales ou atomiques et qui pourraient, dans l'avenir, servir de base à une nouvelle définition du kilogramme.

■ Nom spécial donné à l'unité SI mole par seconde, le katal, pour exprimer l'activité catalytique (CR, 145 et *Metrologia*, 2000, 37, 95)**Résolution 12**

La 21^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- l'importance pour la santé humaine et la sécurité de faciliter l'emploi des unités du Système international d'unités (SI) dans les domaines de la médecine et de la biochimie,
- qu'une unité en dehors du SI appelée « unité » représentée par le symbole U, qui est égale à $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$, et qui n'est pas cohérente avec le SI, a été largement répandue en médecine et en biochimie depuis 1964 pour exprimer l'activité catalytique,
- que l'absence d'un nom spécial pour désigner l'unité dérivée et cohérente du SI qu'est la mole par seconde a conduit à ce que des résultats de mesures cliniques soient donnés en différentes unités locales,
- que l'emploi des unités SI en médecine et en chimie clinique est vivement recommandé par les unions internationales de ces domaines,
- que la Fédération internationale de chimie clinique et médecine de laboratoire a demandé au Comité consultatif des unités de recommander le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde,
- que tandis que la prolifération de noms spéciaux représente un danger pour le SI, il existe des exceptions pour certains sujets liés à la santé humaine et à la sécurité

(15^e Conférence générale, 1975, Résolutions 8 et 9, 16^e Conférence générale, 1979, Résolution 5),

notant que le nom katal, symbole kat, est utilisé pour l'unité SI mole par seconde depuis plus de trente ans, pour exprimer l'activité catalytique,

décide d'adopter le nom spécial katal, symbole kat, pour l'unité SI mole par seconde pour exprimer l'activité catalytique, particulièrement dans les domaines de la médecine et de la biochimie,

et **recommande** que, lorsque le katal est utilisé, le mesurande soit spécifié en faisant référence au mode opératoire de mesure ; le mode opératoire de mesure doit mentionner le produit indicateur de la réaction mesurée.

CIPM, 2000

■ « utilisation de la valeur de la constante de von Klitzing pour exprimer la valeur d'un étalon de référence de résistance en fonction de l'effet Hall quantique » (PV, 68, 34)

Lors de sa 89^e session en 2000, le CIPM a approuvé la déclaration suivante de la 22^e session du CCEM (CCEM, 22, 22) :

« Le CCEM, considérant le récent ajustement des valeurs des constantes fondamentales recommandé par CODATA en 1998, estime que la valeur de la constante de von Klitzing, R_{K-90} , peut être utilisée pour exprimer la valeur d'un étalon de référence de résistance en fonction de l'effet Hall quantique, avec une incertitude relative de 1×10^{-7} par rapport à l'ohm (un écart-type), incertitude deux fois plus faible que celle qui avait été admise en 1988. »

CIPM, 2001

■ « unités SI » et « unités du SI » (PV, 69, 38-39)

Le Comité international a approuvé en 2001 la proposition suivante du CCU concernant les « unités SI » et les « unités du SI » :

« Nous suggérons que les termes « unité SI » et « unité du SI » fassent tous deux référence aux unités de base et aux unités cohérentes dérivées, ainsi qu'à toutes les unités obtenues en les combinant aux préfixes recommandés des multiples et sous-multiples.

Nous suggérons que le terme « unité cohérente du SI » soit utilisé quand nous désirons restreindre son sens aux seules unités de base et aux unités cohérentes dérivées du SI. »

CIPM, 2002

■ Révision de la mise en pratique de la définition du mètre (PV, 70, 90-93 et *Metrologia*, 40, 103-133)

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures,

rappelant

- qu'en 1983 la 17^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a adopté une nouvelle définition du mètre,
- qu'à la même date la Conférence générale a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)
 - à établir des instructions pour la réalisation pratique de la nouvelle définition du mètre (la mise en pratique),

- à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,
- à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons et à compléter ou réviser par la suite ces instructions,
- qu'en réponse à cette invitation le CIPM a adopté la Recommandation 1 (CI-1983) (mise en pratique de la définition du mètre) avec pour effet
 - que le mètre soit réalisé par l'une des méthodes suivantes :
 - a) au moyen de la longueur l du trajet parcouru dans le vide par une onde électromagnétique plane pendant la durée t ; cette longueur est obtenue à partir de la mesure de la durée t , en utilisant la relation $l = c_0 \cdot t$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - b) au moyen de la longueur d'onde dans le vide λ d'une onde électromagnétique plane de fréquence f ; cette longueur d'onde est obtenue à partir de la mesure de la fréquence f , en utilisant la relation $\lambda = c_0 / f$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,
 - c) au moyen de l'une des radiations de la liste ci-dessous, radiations pour lesquelles on peut utiliser la valeur donnée de la longueur d'onde dans le vide ou de la fréquence, avec l'incertitude indiquée, pourvu que l'on observe les conditions spécifiées et le mode opératoire reconnu comme approprié ;
 - que dans tous les cas les corrections nécessaires soient appliquées pour tenir compte des conditions réelles telles que diffraction, gravitation ou imperfection du vide ;
 - que dans le contexte de la relativité générale, le mètre est considéré comme une unité de longueur propre. Sa définition s'applique donc seulement dans un domaine spatial suffisamment petit, pour lequel les effets de la non-uniformité du champ gravitationnel peuvent être ignorés (notons, qu'à la surface de la Terre, cet effet est d'environ 1×10^{-16} par mètre d'altitude en valeur relative). Dans ce cas, les seuls effets à prendre en compte sont ceux de la relativité restreinte. Les méthodes locales, préconisées en b) et c) pour réaliser le mètre, fournissent le mètre propre, mais la méthode préconisée en a) ne le permet pas nécessairement. La méthode préconisée en a) devrait donc être restreinte aux longueurs l suffisamment courtes pour que les effets prévus par la relativité générale soient négligeables par rapport aux incertitudes de mesure. Si ce n'est pas le cas, il convient de se référer au rapport du Groupe de travail du Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) sur l'application de la relativité générale à la métrologie pour l'interprétation des mesures (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290),
- que le CIPM avait recommandé une liste de radiations à cet effet ;

rappelant aussi qu'en 1992 et en 1997 le CIPM a révisé la mise en pratique de la définition du mètre ;

considérant

- que la science et les techniques continuent à exiger une meilleure exactitude dans la réalisation du mètre ;
- que, depuis 1997, les travaux effectués dans les laboratoires nationaux, au BIPM et dans d'autres laboratoires ont permis d'identifier de nouvelles radiations et des méthodes pour leur mise en œuvre qui conduisent à de plus faibles incertitudes ;
- que l'on s'oriente de plus en plus vers des fréquences optiques pour les activités liées au temps, et que l'on continue à élargir le domaine d'application des radiations recommandées dans la mise en pratique, non seulement à la métrologie dimensionnelle et à la réalisation du mètre, mais aussi à la spectroscopie de haute résolution, à la physique atomique et moléculaire, aux constantes fondamentales et aux télécommunications ;

- que l'on dispose maintenant d'un certain nombre de nouvelles valeurs plus exactes de l'incertitude des fréquences de radiations d'atomes et d'ions refroidis très stables déjà mentionnées dans la liste de radiations recommandées, que la valeur de la fréquence de la radiation de plusieurs espèces d'atomes et d'ions refroidis a aussi été mesurée récemment, et que de nouvelles valeurs améliorées, et présentant des incertitudes réduites de manière significative, d'un certain nombre d'étalons de fréquence optique fondés sur des cuves à gaz ont été déterminées, y compris dans le domaine des longueurs d'ondes pour les télécommunications optiques ;
- que les nouvelles techniques de peigne à impulsions femtosecondes ont un intérêt manifeste pour relier la fréquence des étalons de fréquence optique très stables à celle des étalons de fréquence utilisés pour la réalisation de la seconde du Système international d'unités (SI), que ces techniques de mesure sont un moyen commode pour assurer la traçabilité au SI et peuvent fournir aussi bien des sources de fréquence que des techniques de mesure ;

reconnaît que les techniques de peigne arrivent au moment opportun et sont appropriées, et recommande de poursuivre les recherches pour étudier leurs possibilités ;

accueille favorablement les essais de validation en cours des techniques de peigne effectués par comparaison avec les autres techniques de chaînes de fréquence ;

encourage les laboratoires nationaux de métrologie et les autres laboratoires à poursuivre les études sur les techniques de peigne au plus haut niveau d'exactitude possible et à rechercher la simplicité pour encourager leur mise en pratique la plus étendue ;

recommande

- que la liste des radiations recommandées donnée par le CIPM en 1997 (Recommandation 1 (CI-1997)) soit remplacée par la liste de radiations ci-dessous*, qui inclut ;
 - des valeurs mises à jour de la fréquence des atomes de calcium et d'hydrogène refroidis et de l'ion piégé de strontium,
 - la valeur de la fréquence de nouvelles espèces d'ions refroidis, y compris de l'ion piégé de Hg^+ , de l'ion piégé d' In^+ , et de l'ion piégé d' Yb^+ ,
 - des valeurs mises à jour de la fréquence de lasers asservis sur le rubidium, de lasers à grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (Nd:YAG) et de lasers à hélium-néon (He-Ne) asservis sur l'iode, de lasers à hélium-néon asservis sur le méthane, et de lasers à dioxyde de carbone asservis sur le tétr oxyde d'osmium à 10 μm ,
 - des valeurs de la fréquence d'étalons pour les télécommunications optiques, y compris les lasers asservis sur le rubidium et l'acétylène.

...

* La liste des radiations recommandées, Recommandation 1 (CI-2002), figure dans les PV, 70, 93-101 et dans *Metrologia*, 2003, 40, 104-115. Des mises à jour sont disponibles sur le site Web du BIPM à l'adresse www.bipm.org/fr/publications/mep.html.

■ Équivalent de dose (PV, 70, 102)

Recommandation 2

Le Comité international des poids et mesures,

considérant que

- la définition actuelle de l'unité SI d'équivalent de dose (sievert) comprend un facteur « N » (produit de tous les autres facteurs de multiplication) prescrit par l'International Commission on Radiological Protection (ICRP),
- l'ICRP et l'International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) ont décidé de supprimer ce facteur N qui n'est plus considéré comme nécessaire,
- la définition actuelle de l'équivalent de dose H dans le Système international d'unités, qui comprend le facteur N , porte à confusion,

décide de modifier l'explication donnée dans la Brochure sur « Le Système International d'Unités (SI) » de la manière suivante :

Voir aussi *J. Radiol. Prot.*, 2005, 25, 97-100.

La grandeur équivalent de dose H est le produit de la dose absorbée D de rayonnements ionisants et du facteur sans dimension Q (facteur de qualité) prescrit par l'ICRU, facteur défini en fonction du transfert d'énergie linéaire :

$$H = Q \cdot D.$$

Ainsi, pour une radiation donnée, la valeur numérique de H en joules par kilogramme peut être différente de la valeur de D en joules par kilogramme, puisqu'elle est fonction de la valeur de Q .

Le Comité **décide** donc de maintenir la dernière phrase de l'explication sous la forme suivante :

Afin d'éviter tout risque de confusion entre la dose absorbée D et l'équivalent de dose H , il faut employer les noms spéciaux pour les unités correspondantes, c'est-à-dire qu'il faut utiliser le nom gray au lieu de joule par kilogramme pour l'unité de dose absorbée D et le nom sievert au lieu de joule par kilogramme pour l'unité d'équivalent de dose H .

CIPM, 2003

■ Révision de la liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre (PV, 71, 70 et *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)

Les mises à jour sont disponibles sur le site Web du BIPM à l'adresse www.bipm.org/fr/publications/mep.html.

Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures,

considérant que

- l'on dispose depuis peu de meilleures valeurs des fréquences des radiations de certains étalons à ions refroidis très stables, déjà publiées dans la liste des radiations recommandées ;
- l'on a déterminé de meilleures valeurs des fréquences des étalons de fréquence optique dans l'infrarouge, fondés sur des cuves à gaz, dans le domaine des télécommunications optiques, valeurs déjà publiées dans la liste des radiations recommandées ;
- l'on a effectué récemment et pour la première fois des mesures de fréquence à l'aide de peignes à impulsions femtosecondes de certains étalons fondés sur des cuves à iode, qui figurent sur la liste complémentaire de radiations recommandées, mesures qui conduisent à une réduction considérable de l'incertitude ;

propose que la liste des radiations recommandées soit révisée pour inclure :

- les valeurs mises à jour des fréquences de la transition quadripolaire de l'ion piégé de $^{88}\text{Sr}^+$ et de la transition octupolaire de l'ion piégé de $^{171}\text{Yb}^+$;
- la valeur mise à jour de la fréquence de l'étalon asservi sur l'acétylène à 1,54 μm ;
- des valeurs mises à jour de la fréquence d'étalons asservis sur l'iode à 543 nm et à 515 nm.

22^e CGPM, 2003

■ Symbole du séparateur décimal (CR, 169 et *Metrologia*, 2004, 41, 104)

Résolution 10

La 22^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant que

- l'un des principaux objectifs du Système international d'unités (SI) est de permettre d'exprimer la valeur des grandeurs d'une manière aisément compréhensible dans le monde entier,

- la valeur d'une grandeur est normalement exprimée par un nombre qui multiplie une unité,
- souvent le nombre utilisé pour exprimer la valeur d'une grandeur contient plusieurs chiffres, avec une partie entière et une partie décimale,
- la 9^e Conférence générale dans sa Résolution 7 (1948) avait décidé que « Dans les nombres, la virgule (usage français) ou le point (usage britannique) sont utilisés seulement pour séparer la partie entière des nombres de leur partie décimale »,
- conformément à la décision du Comité international des poids et mesures lors de sa 86^e session (1997), le Bureau international des poids et mesures utilise maintenant le point (sur la ligne) comme séparateur décimal dans toutes les versions en anglais de ses publications, y compris dans le texte anglais de la Brochure sur le SI (la référence internationale sur le SI), tout en continuant à utiliser la virgule (sur la ligne) comme séparateur décimal dans toutes ses publications en français,
- néanmoins certaines organisations internationales utilisent la virgule sur la ligne comme séparateur décimal dans leurs documents en anglais,
- de plus, certaines organisations internationales, y compris certaines organisations internationales de normalisation, spécifient que le séparateur décimal doit être la virgule sur la ligne, dans toutes les langues,
- la recommandation d'utiliser la virgule sur la ligne comme séparateur décimal est, dans de nombreuses langues, en conflit avec l'usage courant, qui consiste à utiliser le point sur la ligne,
- le fait d'utiliser le point sur la ligne ou la virgule sur la ligne comme séparateur décimal n'est pas toujours lié à la langue, car certains pays de même langue maternelle ont des usages différents, alors que d'autres pays pratiquant le plurilinguisme utilisent le point sur la ligne ou la virgule sur la ligne suivant la langue,

déclare que le symbole du séparateur décimal pourra être le point sur la ligne ou la virgule sur la ligne,

réaffirme que « Pour faciliter la lecture, les nombres peuvent être partagés en tranches de trois chiffres ; ces tranches ne sont jamais séparées par des points, ni par des virgules », comme le recommande la Résolution 7 de la 9^e Conférence générale de 1948.

CIPM, 2005

■ **Clarification de la définition du kelvin, unité de température thermodynamique** (PV, 94, sous presse et *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)

Recommandation 2

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

considérant

- que le kelvin, l'unité de température thermodynamique, est défini par la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau,
- que la température du point triple de l'eau dépend des abondances relatives des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène présents dans l'échantillon d'eau utilisé,
- que cet effet est maintenant l'une des sources majeures d'écarts observés entre les différentes réalisations du point triple de l'eau,

décide

- que la définition du kelvin se réfère à une eau de composition isotopique spécifiée,
- que cette composition isotopique de l'eau soit la suivante :
 $0,000\,155\,76$ mole de ^2H par mole de ^1H ,
 $0,000\,379\,9$ mole de ^{17}O par mole de ^{16}O , et

0,002 005 2 mole de ^{18}O par mole de ^{16}O ,

cette composition étant celle du matériau de référence de l'Agence internationale de l'énergie atomique «Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) », recommandée par l'Union internationale de chimie pure et appliquée dans « Atomic Weights of the Elements: Review 2000 » ,

- que cette composition soit définie dans une note attachée à la définition du kelvin dans la Brochure sur le SI de la manière suivante :

« Cette définition se réfère à l'eau de composition isotopique définie par les rapports de quantité de matière suivants : 0,000 155 76 mole de ^2H par mole de ^1H , 0,000 379 9 mole de ^{17}O par mole de ^{16}O et 0,002 005 2 mole de ^{18}O par mole de ^{16}O ».

■ Révision de la liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre (PV, 94, sous presse et *Metrologia*, 2006, 43, 178)

Recommandation 3

Le Comité international des poids et mesures,

considérant que

- l'on dispose de meilleures valeurs des fréquences des radiations de certains étalons à ion ou à atomes refroidis très stables, déjà publiées dans la liste des radiations recommandées ;
- l'on a déterminé de meilleures valeurs des fréquences des étalons de fréquence optique, fondés sur des cuves à gaz, dans le domaine des télécommunications optiques, dans l'infrarouge, valeurs déjà publiées dans la liste des radiations recommandées ;
- l'on a déterminé de meilleures valeurs des fréquences de certains étalons fondés sur des cuves à iode, valeurs déjà publiées dans la liste complémentaire des sources recommandées ;
- l'on a effectué pour la première fois des mesures de la fréquence de nouveaux atomes refroidis, d'atomes dans la région de l'infrarouge proche et de molécules dans le domaine des télécommunications optiques, à l'aide de peignes à impulsions femtosecondes ;

décide que la liste des radiations recommandées soit révisée pour y inclure :

- les valeurs mises à jour des fréquences des transitions quadripolaires de l'ion piégé de $^{88}\text{Sr}^+$, de l'ion piégé de $^{199}\text{Hg}^+$ et de l'ion piégé de $^{171}\text{Yb}^+$;
- la valeur mise à jour de la fréquence de la transition de l'atome de calcium ;
- la valeur mise à jour de la fréquence de l'étalon asservi sur l'acétylène à 1,54 μm ;
- la valeur mise à jour de la fréquence de l'étalon asservi sur l'iode à 515 nm ;
- la fréquence de la transition de l'atome de ^{87}Sr à 698 nm ;
- les fréquences des transitions de l'atome de ^{87}Rb autour de 760 nm ;
- les fréquences des transitions de la bande ($\nu_1 + \nu_3$) de $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$, et des bandes ($\nu_1 + \nu_3$) et ($\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5$) de $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, autour de 1,54 μm .

Annexe 2. Réalisation pratique des définitions des principales unités

L'annexe 2 est publiée uniquement sous forme électronique sur le site Web du BIPM.
Elle est disponible à l'adresse : [www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix 2/](http://www.bipm.org/fr/si/si_brochure/appendix_2/).

Annexe 3. Unités pour la mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques

Les rayonnements optiques sont susceptibles de produire des modifications chimiques dans certains matériaux vivants ou inertes. Cette propriété est appelée actinisme et les rayonnements capables de causer de tels changements sont connus sous le nom de rayonnements actiniques. Les rayonnements actiniques ont la propriété fondamentale qu'à l'échelle moléculaire un photon interagit avec une molécule pour altérer ou briser cette molécule en de nouvelles espèces moléculaires. Il est donc possible de définir des grandeurs photochimiques ou photobiologiques spécifiques en fonction de l'effet du rayonnement optique sur les récepteurs chimiques ou biologiques correspondants.

Dans le domaine de la métrologie, la seule grandeur photobiologique qui ait été formellement définie du point de vue des mesures selon les règles du SI est l'interaction de la lumière avec l'œil humain dans la vision. Une unité de base du SI, la candela, a été définie pour cette importante grandeur photobiologique. Plusieurs autres grandeurs photométriques, dont les unités sont dérivées de la candela, ont également été définies (comme le lumen ou le lux, voir tableau 3, chapitre 2, p. 28).

Les définitions des grandeurs et des unités photométriques sont publiées dans le *Vocabulaire international de l'éclairage*, publication CIE 17.4 (1987), ou dans le *Vocabulaire électrotechnique international*, publication CEI 50, chapitre 845 : Éclairage.

1 Spectre d'action actinique

Un rayonnement optique peut être caractérisé par sa distribution spectrale de puissance. Les mécanismes selon lesquels le rayonnement optique est absorbé par le système chimique ou biologique sont en général très complexes, et sont toujours fonction de la longueur d'onde (ou de la fréquence). Pour les applications métrologiques, cependant, la complexité des mécanismes d'absorption peut être ignorée et l'effet actinique est simplement caractérisé par un spectre d'action actinique qui relie la réponse photochimique ou photobiologique au rayonnement incident. Ce spectre d'action actinique décrit l'efficacité relative d'un rayonnement optique monochromatique à la longueur d'onde λ à produire une réponse actinique donnée. Il est donné en valeur relative, normalisée à 1 pour le maximum de l'efficacité. Généralement, les spectres d'action actinique sont définis et recommandés par les organisations internationales scientifiques ou de normalisation.

Pour la vision, deux spectres d'action ont été définis par la CIE et approuvés par le CIPM : $V(\lambda)$ pour la vision photopique et $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique. Ces spectres d'action sont utilisés dans les mesures des grandeurs photométriques et font implicitement partie de la définition de l'unité SI pour la photométrie, la candela. La vision photopique est détectée sur la rétine de l'œil par les cônes, sensibles aux luminances élevées ($L > \text{environ } 10 \text{ cd m}^{-2}$), qui correspondent à la vision diurne. La vision scotopique est détectée sur la rétine de l'œil par les bâtonnets, sensibles aux faibles luminances ($L < \text{environ } 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$), qui correspondent à la vision nocturne. Dans le cas de luminances intermédiaires entre la vision photopique et la vision

Principes régissant la photométrie, *Monographie BIPM*, 1983, 32 pp.

scotopique, les cônes et les bâtonnets fonctionnent simultanément, on est alors dans le domaine de la vision mésopique.

Des spectres d'action ont également été définis par la CIE pour d'autres effets actiniques, tel que le spectre d'action de l'érythème (rougissement de la peau) dû au rayonnement ultraviolet. Ces spectres n'ont cependant pas de statut particulier dans le SI.

2 Mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques ; unités correspondantes

Les grandeurs et unités photométriques actuellement en usage dans le domaine de la vision sont bien établies et très largement utilisées depuis fort longtemps. Elles ne sont pas concernées par les règles énoncées dans la suite de ce texte. Pour toutes les autres grandeurs photochimiques ou photobiologiques, les règles suivantes doivent être appliquées pour la définition des unités à utiliser.

Une grandeur photochimique ou photobiologique est définie d'une manière purement physique comme une grandeur dérivée de la grandeur radiométrique correspondante, par l'évaluation de l'effet du rayonnement selon son action sur un récepteur sélectif. La sensibilité spectrale de ce récepteur est définie par le spectre d'action de l'effet photochimique ou photobiologique considéré. La grandeur est donnée par l'intégrale par rapport à la longueur d'onde de la distribution spectrale de la grandeur radiométrique considérée, pondérée par le spectre d'action actinique approprié. L'utilisation d'une intégrale suppose implicitement l'additivité arithmétique des grandeurs actiniques ; dans la pratique, cette loi n'est pas parfaitement vérifiée. Le spectre d'action est donné en valeur relative ; c'est une grandeur sans dimension dont l'unité SI est le nombre un. La grandeur radiométrique correspondante a sa propre unité radiométrique. Ainsi, selon la règle d'obtention de l'unité SI d'une grandeur dérivée, l'unité de la grandeur photochimique ou photobiologique est celle de la grandeur radiométrique correspondante. Quand on donne un résultat numérique, il est indispensable de spécifier s'il s'agit d'une grandeur radiométrique ou d'une grandeur actinique puisque les unités sont les mêmes. Si pour un effet actinique il existe plusieurs spectres d'action, le spectre d'action utilisé pour les mesures doit être clairement spécifié.

Cette façon de définir les unités à utiliser pour les grandeurs photochimiques et photobiologiques a été recommandée par le Comité consultatif de photométrie et radiométrie lors de sa 9^e session en 1977.

À titre d'exemple, l'éclairement érythémal effectif E_{er} d'une source de rayonnement ultraviolet est obtenu en pondérant l'éclairement énergétique spectrique du rayonnement à la longueur λ par l'efficacité de ce rayonnement à provoquer un érythème à cette longueur d'onde, et en sommant sur l'ensemble de toutes les longueurs d'onde présentes dans le spectre de la source. Ceci peut s'exprimer sous la forme mathématique suivante :

$$E_{er} = \int E_{\lambda} s_{er}(\lambda) d\lambda$$

où E_{λ} est l'éclairement énergétique spectrique en $W m^{-2} nm^{-1}$ à la longueur d'onde λ et $s_{er}(\lambda)$ le spectre d'action de l'érythème, normalisé à 1 à son maximum. Le résultat de cette détermination donne l'éclairement érythémal, E_{er} , exprimé en $W m^{-2}$ selon les règles du SI.

Liste des sigles utilisés dans le présent volume*

1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

BAAS	British Association for the Advancement of Science
BIH	Bureau international de l'heure
BIPM	Bureau international des poids et mesures
CARICOM	Communauté des Caraïbes/Caribbean Community
CCAUUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations
CCDS*	Comité consultatif pour la définition de la seconde, <i>voir</i> CCTF
CCE*	Comité consultatif d'électricité, <i>voir</i> CCEM
CCEM	(auparavant dénommé CCE) Comité consultatif d'électricité et magnétisme
CCL	Comité consultatif des longueurs
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CCTF	(auparavant dénommé CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences
CCU	Comité consultatif des unités
CEI	Commission électrotechnique internationale
CGPM	Conférence générale des poids et mesures
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CIPM	Comité international des poids et mesures
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
CR	<i>Comptes rendus</i> de la Conférence générale des poids et mesures
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IERS	Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence/International Earth Rotation and Reference Systems Service
ISO	Organisation internationale de normalisation
OIML	Organisation internationale de métrologie légale
OMS	Organisation mondiale de la santé
PV	<i>Procès-verbaux</i> du Comité international des poids et mesures
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, UIPPA
UAI	Union astronomique internationale
UICPA	Union internationale de chimie pure et appliquée
UIPPA	Union internationale de physique pure et appliquée

* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus soit figurent sous un autre sigle.

2 Sigles des termes scientifiques

CGS	Système d'unités cohérent fondé sur les trois unités mécaniques centimètre, gramme et seconde
EIPT-68	Échelle internationale pratique de température de 1968
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
EPT-76	Échelle provisoire de température de 1976
ITS-90*	International Temperature Scale of 1990, <i>voir</i> EIT-90
MKS	Système d'unités fondé sur les trois unités mécaniques mètre, kilogramme et seconde
MKSA	Système d'unités quadri-dimensionnel fondé sur le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère
SI	Système international d'unités
TAI	Temps atomique international
TCG	Temps-coordonnée géocentrique
TT	Temps terrestre
UTC	Temps universel coordonné
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water

Index

Le numéro en caractère gras indique la page où se trouve la définition de l'unité ou du terme.

A

accélération due à la pesanteur (g_n), 53
 actinisme, 17, 85
 activité d'un radionucléide, 28, 62
 ampère (A), 14, 19-20, **23**, 26, 54, 56, 57, 59, 60
 atmosphère normale, 38, **57**
 atome gramme, 24
 atome de césium, niveaux hyperfins, 23

B

bar, 38, 56
 barn, 38
 becquerel (Bq), 28, 29, 30, 62, **68**
 bel (B), 38-39, 45
 bohr, rayon de Bohr, 36-37
 bougie nouvelle, 53
 British Association for the Advancement of Science (BAAS), 19

C

calorie, 56
 calcul formel, 42-43
 candela (cd), 14, 20, **26**, 56, 57, 59, 64, 68-69, 85
 capacité thermique, 29, 42
 CEI, norme 60027, 14
 CGS, 19, 39, 55
 CGS de Gauss, 15, 39
 CGS-UEM, 15, 39
 CGS-UES, 15, 39
 charge électrique élémentaire, 36, 37
 chiffres groupés par tranches de 3 chiffres, 44, 81
 chimie clinique, 25, 76
 CODATA, 37, 77

constante,

d'Avogadro, 25, 36
 de Josephson (K_J , K_{J-90}), 72, 73
 de Planck réduite, 36, 37
 de von Klitzing (R_K , R_{K-90}), 21, 74, 77
 magnétique, perméabilité du vide, 14, 23

Convention du Mètre, 18-20

coulomb (C), 28, **54**, 56, 60

Coulomb, loi de, 14

courant électrique, 14-15, 23, 26, **54**, 57, 59

curie (Ci), 62

D

dalton (Da), 36-37
 décibel (dB), 38-39, 45
 degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$), 24, 28-29, 42, 44, 55, 56
 dose absorbée, 18, 28-30, 68, 69, 72, 80
 dose, équivalent de, *voir* sievert
 dyne (dyn), 39, 56

E

eau, composition isotopique, 24, 81

échelle

de température thermodynamique, 57
 internationale de température de 1990 (EIT-90), 74-75

effet

Hall (y compris Hall quantique), 21, 72, **74**, 77

Josephson, 72, **73**

électronvolt (eV), 36, 37

énergie de Hartree, 36, 37

équations électromagnétiques à quatre grandeurs, 14

erg, 39, 56

F

facteur de rationalisation, 15
farad (F), 28, **54**, 60

G

gal (Gal), 39
Gauss, 19
gauss (G), 39
Giorgi, 20
gon, 35
grade, 35
gramme, 17, 19, 33, 56, 62-63
grandeurs, 13
 biologiques, 17
 de base, **13**-15, 26
 de comptage, 16, 31
 dérivées, **13**, 15, 27-29
 de dimension un, 16, 27, 30-31, 45
 électromagnétiques, 14, 39
 logarithmiques, 38-39, 45
 photobiologiques, 17, 85-86
 photochimiques, 17, 85-86
 photométriques, **53**, 64, 85-86
 règles d'écriture, 42-45
 sans dimension, 16, 27, 30-31, 45-46, 70
 symboles (recommandés), 15, 42-44
 valeur numérique, 42-44
gray (Gy), 28, 30, **68**, 72

H

Hartree (énergie de), hartree, 36, 37
hectare (ha), 35
henry (H), 28, **54**, 56, 60
hertz (Hz), 28, 56, 60
heure (h), 33, 35, 56

I

incertitude, 45
intensité lumineuse, 15, **26**, 53, 57, 59, 64, 68-69
ISO
 ISO/TC 12, 14, 70
 norme ISO 31, 12, 14, 43
 norme ISO/IEC 80000, 14

J

joule (J), 16, 28, 30, 42, **54**-55, 60
jour (d), 33, 35

K

katal (kat), 28, **76**-77
kelvin (K), 14, 21, 23-**24**, 26, 63-64, 81
kibioctet, 32
kilogramme, 14, 19-20, **22**, 26, 33, 52, 53, 57, 59, 76
 multiples et sous-multiples, 17, 33, 62-63
 prototype international, 19, **22**, 52

L

législation sur les unités, 18
litre (L ou l), **35**, 41, 52, 56, 60-61, 62, 69-70
longueur, 14-15, 19, **22**, 26, 52, 53, 57, 59
lumen (lm), 28, 56, 60 ; nouveau, 53
lux (lx), 28, 56, 60

M

masse, 14, 15, 19, **22**, 26, 33, 53, 57, 59, 62, 76
masse et poids, 53
masse de l'électron, 36, 37
Maxwell, 19
maxwell (Mx), 39
mésopique, *voir* vision mésopique
mètre (m), 14, 19, **22**, 41, 52, 53, 57, 58, 59, 71
 prototype international, 19, **22**, 52, 53, 58, 59
microseconde d'arc (μ as), 33, 35
mille marin, 35, 38-39
milliseconde d'arc (mas), 33, 35
millimètre de mercure, 38
minute (min), 35
MKS, 20, 54
MKSA, 20
mole (mol), 14, 20-21, 24-**25**, 26, 67
molécule gramme, 24
multiples du kilogramme, 17, 33, 62-63
multiples et sous-multiples, préfixes, 16-17, 32-33, 59, 62, 68, 75

N
néper (Np), 38-39, 45
newton (N), 23, 28, **54**, 56, 60
note historique, 18-20

O

œrsted (Oe), 39
ohm (Ω), 19, 23, 28, 41, **54**, 56, 60, 72-73, 74, 77
OIML, 18
OMS, 18

P

pascal (Pa), 28, 41, 66
phot (ph), 39
photopique, *voir* vision photopique
physique atomique, 36
pied, 40
poids (*voir* à masse)
poids atomique, 24-25
poids moléculaire, 24-25
point triple de l'eau, **24**, 54-55, 57, 64, 81
poise (P), 39, 56
pouce, 40
pourcent, 46
ppb, 46
ppm, 46
ppt, 46
préfixes SI, 16-17, 19, **32-33**, 35, 38-39, 41-42, 59, 62, 65, 68, 75

Q

quantité de matière, 15, 24-**25**, 26, **67**
quantité de chaleur, *voir* joule

R

radian (rad), 28-29, 31, 45, 60, 70, 75-76
radiothérapie, 18
rayonnement actinique, 17, 85-86
rayonnements ionisants, 18, 30, 68, 69, 72, 79-80
relativité générale, 17, 78

S

scotopique, *voir* vision scotopique
seconde (s), 14, 19, 21-**23**, 26, 41, 56, 57-58, 59, 63
seconde d'arc, 35
séparateur décimal, 12, 44-45, 80-81
SI, *voir* Système international d'unités
siemens (S), 28, 66
sievert (Sv), 28-29, 30, 69, 72, 79
stéradian (sr), 28-29, 31, 45, 60, 70, 75-76

stilb (sb), 39, 56
stokes (St), 39
symboles
 dimensionnels, 15
 écriture et emploi des, 41-46
 des grandeurs, 15, 26, 42, 44-45
 unités, 26, 41, 59
 unités (obligatoires), 15, 26, 41-42
 unités dérivées ayant des noms spéciaux, 16, 27-30
système
 international d'unités (SI), 14, 55, 57, 58, 59 ; création, 55, 57, 58, 59
 international de grandeurs, **14**
 métrique décimal, 19

T

TAI, *voir* Temps atomique international
température
 Celsius, 24, 28, 44
 thermodynamique, 14-15, 23-**24**, 26, 57, 59, 63-64, 81-82
temps
 durée, 13, 15, 22-**23**, 26, 57-58, 63
 atomique international (TAI), 66-67
 universel coordonné (UTC), 67-68
tesla (T), 28, 60
Thomson, 19
tonne, 35, 56 ; métrique, 35

U

UICPA, 25 ; livre vert, 43
UIPPA SUNAMCO, 25 ; livre rouge ; 43
unité(s)
 absolues, 23
 acoustiques, 17
 astronomique, 36-37
 atomiques, 36-37
 ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers, 16, 27-30
 CGS, 19, 39, 55
 CGS de Gauss, 15, 39
 CGS-UEM, 15, 39
 CGS-UES, 15, 39
 de base, **13**, 21-26, 57, 59, 67 ;
 définitions, **21-26**
 dérivées, **13**, 27-30, **64-65**
 dérivées cohérentes, 16, **27-30**, 77
 électriques, **54**

- en dehors du SI, 34-40
- des grandeurs biologiques, 17-18
- internationales OMS, 18
- multiples et sous-multiples des, 17, 32-33,
41, 59, 62, 68, 75
- naturelles, 36-37
- noms, 42
- photométriques, **53**, 64, 85-86
- pratiques, 19, **55-56**, 57, 58
- réalisation, 11, **21**, 83
- règles d'écriture, 56
- SI, 17, 21-30
- supplémentaires, 60, **65**, 70, 75-76
- symboles, 26, 41-42, 56
- UTC, *voir* Temps universel coordonné

V

- viscosité
 - cinématique (stokes), 39
 - dynamique (poise), 39, 56
- vision
 - mésopique, 69, 86
 - photopique, 69, 85
 - scotopique, 69, 85-86
- vitesse de la lumière dans le vide, 22, 37, 78
- volt (V), 28, **54**, 56, 60, 72, 73
- von Klitzing, *voir* constante de

W

- watt (W), 28, **54**, 56, 60
- Weber, 19
- weber (Wb), 28, **54**, 60

Y

- yard, 40