

# Le Système international d'unités

9<sup>e</sup> édition 2019

# The International System of Units





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

English version

---

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



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

#### Note concernant les droits d'auteur

La Brochure sur le SI est distribuée selon les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/>), qui permet l'utilisation sans restriction, la distribution et la reproduction sur quelque support que soit, sous réserve de mentionner dûment l'auteur ou les auteurs originaux ainsi que la source de l'œuvre, d'intégrer un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été effectuées.

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

ISBN 978-92-822-2272-0

# 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 m<sup>2</sup>) 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 ; les objectifs du BIPM sont les suivants :

- représenter la communauté métrologique internationale afin d'en maximiser la reconnaissance et l'impact,
- être un centre de collaboration scientifique et technique entre les États Membres, leur permettant de développer des aptitudes pour les comparaisons internationales de mesure, sur le principe des frais partagés,
- coordonner le système mondial de mesure, en garantissant la comparabilité et la reconnaissance au niveau international des résultats de mesures.

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 et se réunit généralement 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 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 20 mai 2019, on comptait cinquante-neuf États

Membres : Afrique du Sud, Allemagne, Arabie saoudite, Argentine, Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, Colombie, Corée (République de), Croatie, Danemark, Égypte, Émirats arabes unis, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran (Rép. islamique d'), Irak, Irlande, Israël, Italie, Japon, Kazakhstan, Kenya, Lituanie, Malaisie, Mexique, Monténégro, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord, Serbie, République tchèque, Singapour, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Thaïlande, Tunisie, Turquie, Ukraine, Uruguay.

Quarante-deux États et Entités économiques sont Associés à la Conférence générale des poids et mesures : Albanie, Azerbaïdjan, Bangladesh, Belarus, Bolivie, Bosnie-Herzégovine, Botswana, CARICOM, Costa Rica, Cuba, Équateur, Estonie, Éthiopie, Géorgie, Ghana, Hong Kong (Chine), Jamaïque, Koweït, Lettonie, Luxembourg, Macédoine du Nord, Malte, Maurice, Moldova (République de), Mongolie, Namibie, Oman, Ouzbékistan, Panama, Paraguay, Pérou, Philippines, Qatar, République arabe syrienne, Seychelles, Soudan, Sri Lanka, Taipei chinois, Tanzanie, Viet Nam, Zambie et Zimbabwe.

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 du directeur.

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 (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). 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 (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). 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  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; 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 et biologie (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 internet 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.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité international des poids et mesures, publie des articles sur la métrologie scientifique, 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

<b>Préface à la 9<sup>e</sup> édition</b>	<b>10</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>13</b>
1.1 Le SI défini en fonction de constantes de la physique	13
1.2 Fondement de l'utilisation de constantes afin de définir le SI	13
1.3 Mise en œuvre du SI	14
<b>2 Le Système international d'unités</b>	<b>15</b>
2.1 Définition de l'unité d'une grandeur	15
2.2 Définition du SI	15
2.2.1 Nature des sept constantes définissant le SI	16
2.3 Définitions des unités du SI	17
2.3.1 Unités de base	18
2.3.2 Réalisation pratique des unités du SI	23
2.3.3 Dimension des grandeurs	24
2.3.4 Unités dérivées	25
2.3.5 Unités des grandeurs décrivant des effets biologiques et physiologiques	29
2.3.6 Les unités SI dans le cadre de la théorie de la relativité générale	30
<b>3 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI</b>	<b>31</b>
<b>4 Unités en dehors du SI dont l'usage est accepté avec le SI</b>	<b>33</b>
<b>5 Règles d'écriture des noms et symboles d'unités et expression des valeurs des grandeurs</b>	<b>35</b>
5.1 Utilisation des symboles et noms des unités	35
5.2 Symboles des unités	35
5.3 Noms des unités	36
5.4 Règles et conventions stylistiques servant à exprimer les valeurs des grandeurs	36
5.4.1 Valeur et valeur numérique d'une grandeur ; utilisation du calcul formel	36
5.4.2 Symboles des grandeurs et unités	37
5.4.3 Écriture de la valeur d'une grandeur	38
5.4.4 Écriture des nombres et séparateur décimal	38
5.4.5 Expression de l'incertitude de mesure associée à la valeur d'une grandeur	38
5.4.6 Multiplication ou division des symboles des grandeurs, des valeurs des grandeurs et des nombres	39
5.4.7 Écriture des valeurs des grandeurs exprimées par des nombres	39
5.4.8 Angles plans, angles solides et angles de phase	40

<b>Annexe 1.</b>	<b>Décisions de la CGPM et du CIPM</b>	<b>41</b>
<b>Annexe 2.</b>	<b>Réalisation pratique des principales unités</b>	<b>95</b>
<b>Annexe 3.</b>	<b>Unités pour la mesure des grandeurs photochimiques et photobiologiques</b>	<b>96</b>
<b>Annexe 4.</b>	<b>Notes historiques sur l'évolution du Système international d'unités et de ses unités de base</b>	<b>97</b>
	Partie 1. L'évolution historique de la réalisation des unités du SI	97
	Partie 2. L'évolution historique du Système international	99
	Partie 3. Perspective historiques sur les unités de base du SI	102
<b>Liste des sigles</b>		<b>106</b>
<b>Index</b>		<b>108</b>

## Préface à la 9<sup>e</sup> édition

Depuis son établissement en 1960 par une résolution adoptée par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) à sa 11<sup>e</sup> réunion, le Système international d'unités (SI) est utilisé dans le monde entier comme le système préféré d'unités et comme le langage fondamental de la science, de la technologie, de l'industrie et du commerce.

Cette Brochure sur le SI est publiée par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) afin d'expliquer et de promouvoir le SI. Elle regroupe les résolutions de la CGPM et les décisions du Comité international des poids et mesures (CIPM) les plus importantes concernant le système métrique depuis la première réunion de la CGPM en 1889.

Le SI a toujours été un système pratique et dynamique qui a évolué afin d'exploiter les avancées scientifiques et technologiques les plus récentes. En particulier, les formidables progrès réalisés ces 50 dernières années en physique atomique et en métrologie quantique ont permis de réviser les définitions de la seconde et du mètre et d'ajuster la représentation pratique des unités électriques afin de tirer parti des phénomènes atomiques et quantiques pour atteindre, lors de la réalisation de ces unités, des niveaux d'exactitude qui ne sont limités que par nos aptitudes techniques et non par les définitions elles-mêmes. Ces progrès scientifiques, ainsi que l'évolution des technologies de mesure, ont conduit à apporter des changements au SI qui ont tous été décrits dans les précédentes éditions de cette brochure.

La 9<sup>e</sup> édition de la Brochure sur le SI a été préparée à la suite de l'adoption par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion d'un ensemble de changements profonds. La CGPM a adopté une nouvelle manière de formuler les définitions des unités en général, et celles des sept unités de base en particulier, en fixant la valeur numérique de sept constantes définissant le SI. Parmi ces constantes figurent des constantes fondamentales de la nature, telles que la constante de Planck et la vitesse de la lumière : ainsi, les définitions prennent pour fondement, et représentent, notre compréhension actuelle des lois de la physique. Pour la première fois, nous disposons d'un ensemble complet de définitions dont aucune ne fait référence à des étalons physiques, des propriétés matérielles ou des descriptions de mesure. Les changements apportés au SI permettent de réaliser l'ensemble des unités à un niveau d'exactitude qui n'est finalement limité que par la structure quantique de la nature et nos aptitudes techniques mais non par les définitions elles-mêmes. Toute équation valide de la physique établissant un lien entre des constantes définissant le SI et une unité peut être utilisée pour réaliser l'unité en question, ce qui ouvre la voie à de nouvelles possibilités d'innovation, l'unité étant réalisable en tout lieu à un niveau d'exactitude croissant à mesure que les technologies progressent. Ainsi, cette révision du SI constitue une avancée historique fondamentale.

La révision du SI a été adoptée par la CGPM en novembre 2018 et les nouvelles définitions prendront effet à compter du 20 mai 2019, date anniversaire de la signature de la Convention du Mètre, célébrée par la Journée mondiale de la métrologie. Les changements auront certes de profondes répercussions mais une attention particulière a été portée au fait de garantir la cohérence de ces définitions avec celles en vigueur au moment de la mise en œuvre de la révision du SI.

Nous attirons l'attention sur le fait que depuis son établissement en 1960, le Système international d'unités a, sous sa forme abrégée, toujours été désigné comme « le SI ». Ce principe a été maintenu dans les huit précédentes éditions de la brochure et a été réaffirmé dans la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion, qui a par ailleurs confirmé que le titre de cette brochure était simplement « Le Système international d'unités ». Cette cohérence des références au SI reflète les efforts de la CGPM et du CIPM afin d'assurer la continuité des valeurs des mesures exprimées en unités du SI lors de chaque changement effectué.

Le texte de la brochure a pour objectif de fournir une description complète du SI et d'en donner le contexte historique. En outre, la brochure compte quatre annexes :

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

L'annexe 2 est uniquement disponible en version électronique ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Elle concerne la réalisation pratique des sept unités de base et d'autres unités importantes pour chaque domaine métrologique. Cette annexe sera mise à jour régulièrement afin de refléter les progrès des techniques expérimentales utilisées pour réaliser les unités.

L'annexe 3 est uniquement disponible en version électronique ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). Elle décrit les unités permettant de mesurer les grandeurs photochimiques et photobiologiques.

L'annexe 4 rend compte de l'évolution historique du SI.

Nous tenons, pour conclure, à remercier les membres du Comité consultatif des unités (CCU) du CIPM qui ont eu pour responsabilité de préparer cette brochure. Le CCU et le CIPM ont tous deux approuvé le texte final.

mars 2019



B. Inglis

Président du CIPM



J. Ullrich

Président du CCU



M.J.T. Milton

Directeur du BIPM

Note :

La CGPM à sa 22<sup>e</sup> réunion (2003) a décidé, suite à une décision prise par le CIPM en 1997, que « le symbole du séparateur décimal pourra être soit le point sur la ligne, soit la virgule sur la ligne ». Conformément à 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 d'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 »). À cet égard, le texte anglais publié ici suit la série de normes ISO/IEC 80000 « *Grandeurs et unités* ». Néanmoins, les symboles des unités du SI utilisés dans la présente brochure demeurent identiques dans toutes les langues.

Le lecteur doit noter que le texte officiel des réunions de la CGPM et des procès-verbaux du CIPM est celui rédigé en français. La présente brochure est également disponible en anglais mais c'est le français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a un doute sur l'interprétation.

# 1 Introduction

## 1.1 Le SI défini en fonction de constantes de la physique

La Brochure sur le SI présente les informations nécessaires à la définition et à l'utilisation du Système international d'unités, qui est universellement connu sous l'abréviation SI et dont la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a la responsabilité. Le SI a été formellement défini et établi en 1960 par la CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion ; il a ensuite été révisé à plusieurs reprises afin de répondre aux exigences des utilisateurs et aux avancées de la science et de la technologie. La révision la plus récente, et probablement la plus importante depuis la création du SI, a été approuvée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) : elle est décrite dans cette 9<sup>e</sup> édition de la Brochure sur le SI. La Convention du Mètre et ses organes, à savoir la CGPM, le Comité international des poids et mesures (CIPM) et le Bureau international des poids et mesures (BIPM), ainsi que les Comités consultatifs, sont décrits dans le texte « Le BIPM et la Convention du Mètre » (page 5).

Le SI est un système d'unités cohérent qui est utilisé dans tous les aspects de la vie, que ce soit le commerce international, la production industrielle, la santé et la sécurité, la protection de l'environnement, ou les sciences fondamentales qui sont à la base de tous ces domaines. Le système de grandeurs qui sous-tend le SI et les équations définissant les relations entre ces grandeurs reposent sur la description actuelle de la nature et sont connus de tous les scientifiques, techniciens et ingénieurs.

Les définitions des unités du SI sont établies à partir d'un ensemble de sept constantes de la physique. À partir des valeurs fixées de ces sept constantes, exprimées en unités SI, il est possible de déduire toutes les unités du système. Ces sept constantes sont ainsi l'élément le plus essentiel de la définition de tout le système d'unités. Le choix spécifique de ces sept constantes a été considéré le meilleur possible, en tenant compte de la précédente définition du SI – qui était fondée sur sept unités de base – et des progrès de la science.

Diverses méthodes expérimentales, décrites par les Comités consultatifs du CIPM, peuvent être utilisées afin de réaliser les unités : ces descriptions sont également appelées des « mises en pratique ». Ces réalisations sont susceptibles d'être révisées lorsque de nouvelles expériences seront mises au point, c'est pourquoi la présente brochure ne contient pas de recommandations en la matière : de telles informations sont disponibles sur le site internet du BIPM.

## 1.2 Fondement de l'utilisation de constantes afin de définir le SI

Depuis l'établissement du SI, les unités du SI ont été présentées en fonction d'un ensemble d'*unités de base* – au nombre de sept depuis quelques décennies. Toutes les autres unités, appelées *unités dérivées*, sont formées à partir de produits de puissances des unités de base.

Différents types de définitions ont été utilisés pour les unités de base : des propriétés particulières de certains artefacts comme la masse du prototype international du kilogramme pour l'unité « kilogramme » ; un état physique particulier tel que le point triple de l'eau pour l'unité « kelvin » ; des principes expérimentaux nécessitant des conditions idéalisées comme dans le cas des unités « ampère » et « candela » ; ou des constantes de la nature telles que la vitesse de la lumière pour la définition de l'unité « mètre ».

Pour avoir une utilité pratique, ces unités doivent non seulement être définies mais elles doivent également être réalisées concrètement pour pouvoir être disséminées. Dans le cas d'un artefact, la définition et la réalisation sont équivalentes. Ce choix a été privilégié par d'anciennes civilisations avancées. Bien que cette méthode soit simple et claire, les artefacts présentent un risque de perte, d'endommagement ou de variation de leurs caractéristiques. Les autres types de définitions d'une unité sont devenus de plus en plus abstraits ou idéalisés. D'un point de vue conceptuel, les réalisations sont alors dissociées des définitions, de sorte que les unités puissent, par principe, être réalisées de façon indépendante en tout lieu et à tout moment. En outre, de meilleures réalisations pourront être développées grâce aux progrès des sciences et des technologies, sans qu'il ne soit nécessaire pour autant de redéfinir l'unité concernée. Comme le démontre l'histoire de la définition du mètre, fondée d'abord sur des artefacts puis sur une transition atomique de référence et, enfin, sur la fixation d'une valeur numérique de la vitesse de la lumière, ces avantages ont conduit à prendre la décision de définir toutes les unités à l'aide de constantes choisies.

Le choix des unités de base n'a jamais été imposé ; ce choix s'est affirmé dans le temps et il est désormais bien connu des utilisateurs du SI. La description du SI en fonction d'unités de base et d'unités dérivées est conservée dans la présente brochure mais a été reformulée du fait de l'adoption des constantes définissant le SI.

## 1.3 Mise en œuvre du SI

Les définitions des unités du SI, telles qu'adoptées par la CGPM, représentent le niveau de référence le plus élevé en matière de traçabilité de mesure au SI.

Les laboratoires de métrologie à travers le monde mettent au point des réalisations pratiques des définitions afin de permettre la traçabilité de leurs mesures au SI. Les Comités consultatifs déterminent le cadre permettant d'établir l'équivalence des réalisations afin d'harmoniser la traçabilité au niveau mondial.

Les organismes de normalisation peuvent donner des informations supplémentaires sur les grandeurs et unités, ainsi que sur leurs règles d'application, lorsque cela est requis par les parties intéressées. Lorsque des unités du SI sont mentionnées dans des normes, ces dernières doivent faire référence aux définitions adoptées par la CGPM. De telles informations sont notamment incluses dans les normes internationales élaborées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et la Commission électrotechnique internationale (IEC), telles que les normes de la série ISO/IEC 80000.

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 SI. L'Organisation internationale de métrologie légale (OIML) est en charge de l'harmonisation mondiale des spécifications techniques de ces législations.



## 2 Le Système international d'unités

### 2.1 Définition de l'unité d'une grandeur

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, utilisée comme référence. Le nombre est le rapport entre la valeur de la grandeur en question et l'unité.

Pour une grandeur particulière, différentes unités peuvent être utilisées. Par exemple, la valeur de la vitesse  $v$  d'une particule peut être exprimée sous la forme  $v = 25 \text{ m/s}$  ou  $v = 90 \text{ km/h}$ , les unités « mètre par seconde » et « kilomètre par heure » étant des unités alternatives pour exprimer la même valeur de la grandeur « vitesse ».

Avant d'exprimer un résultat de mesure, il est essentiel que la grandeur considérée soit décrite de façon appropriée. Cela peut être simple, comme dans le cas de la longueur d'une tige en acier particulière, mais peut devenir plus compliqué lorsque qu'un plus haut niveau d'exactitude est requis et lorsque des paramètres supplémentaires, tels que la température, doivent être indiqués.

Pour exprimer le résultat de mesure d'une grandeur spécifique, la *valeur estimée* du mesurande (la grandeur à mesurer) et l'*incertitude* associée à la valeur de cette grandeur sont requises : elles sont exprimées dans la même unité.

Par exemple, la vitesse de la lumière dans le vide est une constante de la nature, notée  $c$ , dont la valeur en unités SI est donnée par la relation  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  où la valeur numérique est 299 792 458 et l'unité  $\text{m/s}$ .

### 2.2 Définition du SI

Comme pour toute grandeur, la valeur d'une constante fondamentale peut être exprimée sous la forme du produit d'un nombre par une unité.

Les définitions présentées ci-dessous précisent la valeur numérique exacte de chaque constante lorsque sa valeur est exprimée dans l'unité du SI correspondante. En fixant la valeur numérique exacte, l'unité devient définie car le produit de la *valeur numérique* par l'*unité* doit être égal à la *valeur* de la constante qui, par hypothèse, est invariante.

Les sept constantes définissant le SI ont été choisies de sorte que toute unité du SI puisse être exprimée à partir de l'une de ces sept constantes ou à partir de produits ou rapports de ces constantes.

Les quotients des unités SI peuvent être exprimés par une barre oblique (/) ou un exposant négatif ( $^{-}$ ).

Par exemple,  
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$   
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

**Le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel :**

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck,  $h$ , est égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- la charge élémentaire,  $e$ , est égale à  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,
- la constante de Boltzmann,  $k$ , est égale à  $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- la constante d'Avogadro,  $N_{\text{A}}$ , est égale à  $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol et cd, selon les relations  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , et  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

La valeur numérique de chacune des sept constantes définissant le SI n'a pas d'incertitude.

**Tableau 1. Les sept constantes définissant le SI et les sept unités qu'elles définissent**

Constante	Symbole	Valeur numérique	Unité
fréquence de la transition hyperfine du césium	$\Delta \nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
vitesse de la lumière dans le vide	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
constante de Planck	$h$	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
charge élémentaire	$e$	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
constante de Boltzmann	$k$	$1,380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
constante d'Avogadro	$N_{\text{A}}$	$6,022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
efficacité lumineuse	$K_{\text{cd}}$	683	$\text{lm W}^{-1}$

Il a toujours été essentiel de préserver, autant que possible, la continuité du Système international d'unités lorsque des modifications ont été apportées au SI. Les valeurs numériques des sept constantes ont été choisies en cohérence avec les précédentes définitions dans la mesure où les avancées de la science et des connaissances le permettaient.

### 2.2.1 Nature des sept constantes définissant le SI

La nature des sept constantes définissant le SI varie de constantes fondamentales de la nature jusqu'à des constantes techniques.

L'utilisation d'une constante pour définir une unité dissocie la définition de la réalisation, ce qui ouvre la voie au développement de réalisations pratiques totalement différentes ou améliorées en fonction des progrès technologiques, sans qu'il soit nécessaire de modifier la définition de l'unité.

Une constante technique telle que  $K_{\text{cd}}$ , efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz, fait référence à une application spécifique. En principe, cette constante technique peut être choisie librement, notamment pour inclure des facteurs physiologiques conventionnels ou d'autres facteurs de pondération. En revanche, cela n'est pas possible en général lorsqu'on utilise une constante fondamentale de la nature car elle est reliée par des équations de la physique à d'autres constantes.

Les sept constantes définissant le SI ont été choisies afin de former un ensemble qui constitue une référence fondamentale, stable et universelle, dont les réalisations pratiques permettent d'obtenir les incertitudes les plus faibles possible. Les conventions choisies et spécifications techniques retenues tiennent également compte des développements historiques.

La constante de Planck,  $h$ , et la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , sont appelées à juste titre constantes fondamentales : elles régissent, respectivement, des effets quantiques et des propriétés générales de l'espace-temps et affectent de la même façon particules et champs sur toutes les échelles et dans tous les environnements.

La charge élémentaire,  $e$ , correspond à une constante de couplage de la force électromagnétique via la constante de structure fine  $\alpha = e^2/(2c\varepsilon_0 h)$  où  $\varepsilon_0$  est la permittivité diélectrique du vide (également connue sous le nom de constante électrique). Certaines théories prédisent une variation de  $\alpha$  avec le temps. Les limites expérimentales de la variation maximale possible de  $\alpha$  sont néanmoins si faibles qu'un effet sur des mesures pratiques à venir peut être exclu.

La constante de Boltzmann,  $k$ , est une constante de proportionnalité entre les grandeurs « température » (avec pour unité le kelvin) et « énergie » (avec pour unité le joule), dont la valeur numérique est obtenue à partir de spécificités historiques concernant l'échelle de température. La température d'un système varie avec son énergie thermique mais cela n'est pas forcément le cas concernant l'énergie interne du système. En physique statistique, la constante de Boltzmann relie l'entropie,  $S$ , au nombre  $\Omega$  d'états quantiques accessibles,  $S = k \ln \Omega$ .

La fréquence du césium,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, a le caractère d'un paramètre atomique qui peut être affecté par l'environnement – par des champs électromagnétiques par exemple. Toutefois, la transition sous-jacente est parfaitement connue et stable ; elle constitue, d'un point de vue pratique, un bon choix de transition de référence. Le choix d'un paramètre atomique comme  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  ne dissocie pas la définition de la réalisation comme dans le cas de  $h$ ,  $c$ ,  $e$  ou  $k$ , mais précise la référence retenue.

La constante d'Avogadro,  $N_A$ , est une constante de proportionnalité entre la grandeur « quantité de matière » (dont l'unité est la mole) et une grandeur dont la valeur est déterminée par comptage d'entités (dont l'unité est le nombre « un », symbole 1). Elle a ainsi le caractère d'une constante de proportionnalité similaire à la constante de Boltzmann,  $k$ .

L'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est une constante technique qui établit une relation numérique exacte entre les caractéristiques purement physiques du flux énergétique stimulant l'œil humain à une fréquence de  $540 \times 10^{12}$  hertz (W) et la réponse photobiologique provoquée par le flux lumineux reçu par un observateur moyen (lm).

## 2.3 Définitions des unités du SI

Avant l'adoption de la révision du SI en 2018, le SI était défini à partir de sept *unités de base*, les *unités dérivées* étant formées à partir de produits de puissances des *unités de base*. En définissant le SI en fixant la valeur numérique de sept constantes spécifiques, cette distinction n'est en principe pas nécessaire car les définitions de toutes les unités, qu'elles soient de base ou dérivées, peuvent être directement établies à partir des sept constantes. Toutefois, les concepts d'unités de base et d'unités dérivées sont conservés car ils sont pratiques et historiquement bien établis ; par ailleurs, la série de normes ISO/IEC 80000 précise les grandeurs de base et les grandeurs dérivées qui doivent nécessairement correspondre aux unités de base du SI et aux unités dérivées, définies dans la présente brochure.

2.3.1 Unités de base

Les unités de base du SI sont rassemblées dans le tableau 2.

Tableau 2. Unités SI de base

Grandeur de base		Unité de base	
Nom	Symbole caractéristique	Nom	Symbole
temps	<i>t</i>	seconde	s
longueur	<i>l, x, r, etc.</i>	mètre	m
masse	<i>m</i>	kilogramme	kg
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<sub>v</sub></i>	candela	cd

Les symboles des grandeurs, imprimés en italique, sont généralement de simples lettres de l'alphabet grec ou latin et constituent des *recommandations*. Les symboles des unités, imprimés en caractères romains (droits), sont *obligatoires* (voir chapitre 5).

La définition du SI fondée sur les valeurs numériques fixées des sept constantes choisies permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas. Les définitions qui en découlent sont indiquées ci-après.

La seconde

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, Δ*ν*<sub>Cs</sub>, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s<sup>-1</sup>.

Cette définition implique la relation exacte Δ*ν*<sub>Cs</sub> = 9 192 631 770 Hz. En inversant cette relation, la seconde est exprimée en fonction de la constante Δ*ν*<sub>Cs</sub> :

$$1 \text{ Hz} = \frac{\Delta \nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta \nu_{\text{Cs}}}.$$

Il résulte de cette définition que la seconde est égale à 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 non perturbé.

Il est fait référence à un atome non perturbé afin d'indiquer clairement que la définition de la seconde du SI se fonde sur un atome de césium isolé qui n'est pas perturbé par un champ externe quel qu'il soit, tel que la radiation d'un corps noir à température ambiante.

La seconde ainsi définie est l'unité de temps propre, au sens de la théorie générale de la relativité. Pour établir une échelle de temps coordonné, les signaux de différentes horloges primaires dans le monde sont combinés, puis des corrections sont appliquées pour tenir compte du décalage relativiste de fréquence entre les étalons à césium (voir section 2.3.6).

Le CIPM a adopté différentes représentations secondaires de la seconde fondées sur un nombre choisi de raies spectrales d'atomes, ions ou molécules. Les fréquences non perturbées de ces raies peuvent être déterminées avec une incertitude relative qui n'est pas

inférieure à celle de la réalisation de la seconde fondée sur la transition hyperfine de l'atome de  $^{133}\text{Cs}$  mais certaines peuvent être reproduites avec une meilleure stabilité.

### Le mètre

**Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en  $\text{m s}^{-1}$ , la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Cette définition implique la relation exacte  $c = 299\,792\,458\,\text{m s}^{-1}$ . En inversant cette relation, le mètre est exprimé en fonction des constantes  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  :

$$1\,\text{m} = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30,663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

Il résulte de cette définition que le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde.

### Le kilogramme

**Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck,  $h$ , égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Cette définition implique la relation exacte  $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\,\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ . En inversant cette relation, le kilogramme est exprimé en fonction des trois constantes  $h$ ,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  et  $c$  :

$$1\,\text{kg} = \left( \frac{h}{6,626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$

relation identique à

$$1\,\text{kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1,475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}.$$

Cette définition permet de définir l'unité  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$  (l'unité des grandeurs physiques « action » et « moment cinétique »). Ainsi associée aux définitions de la seconde et du mètre, l'unité de masse est exprimée en fonction de la constante de Planck  $h$ .

La précédente définition du kilogramme fixait la valeur de la masse du prototype international du kilogramme  $\mathcal{K}$ ,  $m(\mathcal{K})$ , à exactement un kilogramme ; la valeur de la constante de Planck  $h$  devait donc être déterminée de façon expérimentale. L'actuelle définition du kilogramme fixe la valeur numérique de  $h$  de façon exacte et la masse du prototype doit désormais être déterminée de façon expérimentale.

Le nombre choisi pour fixer la valeur numérique de la constante de Planck est tel qu'au moment de l'adoption de cette définition de l'unité de masse, le kilogramme était égal à la masse du prototype international  $m(\mathcal{K}) = 1\,\text{kg}$  avec une incertitude-type relative égale à  $1 \times 10^{-8}$ , soit l'incertitude-type de la combinaison des meilleures estimations de la valeur de la constante de Planck à ce moment-là.

Il est à noter que cette définition de l'unité de masse permet d'établir, en principe, des réalisations primaires à tout point de l'échelle de masse.

### L'ampère

**L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire,  $e$ , égale à  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Cette définition implique la relation exacte  $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  A s. En inversant cette relation, l'ampère est exprimé en fonction des constantes  $e$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  :

$$1\text{ A} = \left( \frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

relation identique à

$$1\text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,6868 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e.$$

Il résulte de cette définition qu'un ampère est le courant électrique correspondant au flux de  $1/(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})$  charges élémentaires par seconde.

La précédente définition de l'ampère, fondée sur la force produite entre deux conducteurs traversés par du courant, fixait la valeur de la perméabilité magnétique du vide  $\mu_0$  (également connue sous le nom de constante magnétique) à exactement  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ , H et N représentant les unités dérivées cohérentes « henry » et « newton », respectivement. La nouvelle définition de l'ampère fixe la valeur numérique de  $e$  et non plus celle de  $\mu_0$ . Par conséquent,  $\mu_0$  doit désormais être déterminée de façon expérimentale.

Ainsi, comme la permittivité diélectrique du vide  $\varepsilon_0$  (également connue sous le nom de constante électrique), l'impédance du vide caractéristique  $Z_0$  et l'admittance du vide  $Y_0$  sont égales à  $1/\mu_0 c^2$ ,  $\mu_0 c$  et  $1/\mu_0 c$  respectivement, les valeurs de  $\varepsilon_0$ ,  $Z_0$ , et  $Y_0$  doivent désormais être déterminées de façon expérimentale et ont la même incertitude-type relative que  $\mu_0$  puisque la valeur de  $c$  est connue avec exactitude. Le produit  $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  et le quotient  $Z_0/\mu_0 = c$  restent exacts. Au moment de l'adoption de l'actuelle définition de l'ampère,  $\mu_0$  était égale à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  avec une incertitude-type relative de  $2,3 \times 10^{-10}$ .

### Le kelvin

**Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann,  $k$ , égale à  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  lorsqu'elle est exprimée en  $\text{J K}^{-1}$ , unité égale à  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $h$ ,  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

Cette définition implique la relation exacte  $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ . En inversant cette relation, le kelvin est exprimé en fonction des constantes  $k$ ,  $h$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  :

$$1\text{ K} = \left( \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{k} \right) \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

relation identique à

$$1\text{ K} = \frac{1,380\,649 \times 10^{-23}}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2,266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}.$$

Il résulte de cette définition qu'un kelvin est égal au changement de la température thermodynamique résultant d'un changement de l'énergie thermique  $kT$  de  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  J.

La précédente définition du kelvin établissait la température du point triple de l'eau  $T_{\text{TPW}}$  comme étant exactement égale à 273,16 K. Étant donné que l'actuelle définition du kelvin fixe la valeur numérique de  $k$  et non plus celle de  $T_{\text{TPW}}$ , cette dernière doit désormais être déterminée de façon expérimentale. Au moment de l'adoption de l'actuelle définition du kelvin,  $T_{\text{TPW}}$  était égale à 273,16 K avec une incertitude-type relative de  $3,7 \times 10^{-7}$  déterminée à partir des mesures de  $k$  réalisées avant la redéfinition.

En raison de la manière dont les échelles de température étaient habituellement définies, il est resté d'usage courant d'exprimer la température thermodynamique, symbole  $T$ , en fonction de sa différence par rapport à la température de référence  $T_0 = 273,15$  K proche du point de congélation de l'eau. Cette différence de température est appelée température Celsius, symbole  $t$  ; elle est définie par l'équation aux grandeurs :

$$t = T - T_0.$$

L'unité de température Celsius est le degré Celsius, symbole  $^{\circ}\text{C}$ , qui par définition est égal en amplitude à l'unité « kelvin ». Une différence ou un intervalle de température peut s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius, la valeur numérique de la différence de température étant la même dans les deux cas. 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 :

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

(voir section 5.4.1 pour une explication de la notation utilisée ici).

Le kelvin et le degré Celsius sont aussi les unités de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) adoptée par le CIPM en 1989 dans sa Recommandation 5 (CI-1989, PV, 57, 26). Il est à noter que l'EIT-90 définit les deux grandeurs  $T_{90}$  et  $t_{90}$  qui sont de très bonnes approximations des températures thermodynamiques correspondantes  $T$  et  $t$ .

Il est également à noter que l'actuelle définition de l'unité de température thermodynamique permet d'établir, en principe, des réalisations primaires du kelvin à tout point de l'échelle de température.

## La mole

**La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro,  $N_A$ , lorsqu'elle est exprimée en  $\text{mol}^{-1}$ .**

**La quantité de matière, symbole  $n$ , d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.**

Cette définition implique la relation exacte  $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . En inversant cette relation, on obtient l'expression exacte de la mole en fonction de la constante  $N_A$  :

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right).$$

Il résulte de cette définition que la mole est la quantité de matière d'un système qui contient  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  entités élémentaires spécifiées.

La précédente définition de la mole fixait la valeur de la masse molaire du carbone 12,  $M(^{12}\text{C})$ , comme étant exactement égale à 0,012 kg/mol. Selon l'actuelle définition de la mole,  $M(^{12}\text{C})$  n'est plus connue avec exactitude et doit être déterminée de façon expérimentale. La valeur choisie pour  $N_A$  est telle qu'au moment de l'adoption de la présente définition de la mole,  $M(^{12}\text{C})$  était égale à 0,012 kg/mol avec une incertitude-type relative de  $4,5 \times 10^{-10}$ .

La masse molaire d'un atome ou d'une molécule X peut toujours être obtenue à partir de sa masse atomique relative à l'aide de l'équation :

$$M(\text{X}) = A_r(\text{X}) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(\text{X}) M_u$$

et la masse molaire d'un atome ou d'une molécule X est également reliée à la masse d'une entité élémentaire  $m(\text{X})$  par la relation :

$$M(\text{X}) = N_A m(\text{X}) = N_A A_r(\text{X}) m_u.$$

Dans ces équations,  $M_u$  est la constante de masse molaire, égale à  $M(^{12}\text{C})/12$ , et  $m_u$  est la constante de masse atomique unifiée, égale à  $m(^{12}\text{C})/12$ . Elles sont liées à la constante d'Avogadro par la relation :

$$M_u = N_A m_u.$$

Dans le terme « quantité de matière », le mot « matière » sera généralement remplacé par d'autres mots précisant la matière en question pour chaque application particulière ; on pourrait par exemple parler de « quantité de chlorure d'hydrogène » ou de « quantité de benzène ». Il est important de définir précisément l'entité en question (comme le souligne la définition de la mole), de préférence en précisant la formule chimique moléculaire 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 ». Dans le domaine de la chimie clinique, le nom « concentration de quantité de matière » est généralement abrégé en « concentration de matière ».

## La candela

**La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en  $\text{lm W}^{-1}$ , unité égale à  $\text{cd sr W}^{-1}$ , ou  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$ , le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $h$ ,  $c$  et  $\Delta\nu_{Cs}$ .**

Cette définition implique la relation exacte  $K_{cd} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$  pour le rayonnement monochromatique de fréquence  $\nu = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ . En inversant cette relation, la candela est exprimée en fonction des constantes  $K_{cd}$ ,  $h$  et  $\Delta\nu_{Cs}$  :

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{cd}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$



relation identique à

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6,626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

$$\approx 2,614\,8305 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}.$$

Il résulte de cette définition que la candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ . La définition du stéradian est donnée au bas du tableau 4.

### 2.3.2 Réalisation pratique des unités du SI

Les méthodes expérimentales de haut niveau utilisées pour réaliser les unités à l'aide d'équations de la physique sont appelées « méthodes primaires ». Une méthode primaire a pour caractéristique essentielle de permettre de mesurer une grandeur dans une unité particulière en utilisant seulement des mesures de grandeurs qui n'impliquent pas l'unité en question. Dans la présente formulation du SI, le fondement des définitions est différent de celui utilisé précédemment, c'est pourquoi de nouvelles méthodes peuvent être utilisées pour la réalisation pratique des unités du SI.

Chaque définition qui indique une condition ou un état physique spécifique impose une limite fondamentale à l'exactitude de la réalisation. Un utilisateur est désormais libre de choisir toute équation de la physique appropriée qui relie les constantes définissant le SI à la grandeur à mesurer. Cette approche pour définir les unités de mesure les plus courantes est beaucoup plus générale car elle n'est pas limitée par l'état actuel de la science ou des technologies : en fonction des progrès à venir, d'autres manières de réaliser les unités à un niveau d'exactitude plus élevé pourront être développées. Avec un tel système d'unités, il n'existe en principe aucune limite concernant l'exactitude avec laquelle une unité peut être réalisée. L'exception reste la seconde pour laquelle la transition micro-onde du césium doit être conservée, pour le moment, comme base de la définition.

Une description plus détaillée de la réalisation des unités du SI figure à l'Annexe 2.

2.3.3 Dimension des grandeurs

Les grandeurs physiques peuvent être organisées selon un système de dimensions qui a été décidé par convention. Chacune des sept grandeurs de base du SI est considérée avoir sa propre dimension. Les symboles utilisés pour les grandeurs de base et ceux utilisés pour indiquer leur dimension sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Grandeurs de base et dimensions utilisées avec le SI

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

Toutes les autres grandeurs, à l'exception de celles dont la valeur est déterminée par comptage, 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,

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

où les exposants  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$  et  $\eta$ , qui sont en général de petits nombres entiers positifs, négatifs ou nuls, sont appelés exposants dimensionnels.

Certaines grandeurs  $Q$  sont définies par une équation aux grandeurs telle que tous les exposants dimensionnels de l'équation 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 espèce. Par exemple, l'indice de réfraction d'un milieu est le rapport de deux vitesses et la permittivité relative est le rapport entre la permittivité d'un milieu diélectrique et celle du vide. De telles grandeurs sont simplement des nombres. L'unité associée est l'unité « un », symbole 1, bien que l'unité « un » soit rarement explicitement écrite (voir section 5.4.7).

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. C'est, par exemple, un nombre de molécules, d'entités cellulaires ou biomoléculaires (telles que des copies d'une séquence d'acide nucléique particulière) ou la dégénérescence en mécanique quantique. Ces grandeurs de comptage ont également pour unité le nombre un.

L'unité « un » est nécessairement l'élément neutre de tout système d'unités : elle est automatiquement présente. Il n'y a pas lieu d'introduire l'unité « un » dans le SI par une décision spécifique. Ainsi, il est possible d'établir la traçabilité formelle au SI par des procédures adéquates et validées.

Les angles plans et solides, lorsqu'ils sont exprimés respectivement en radians et stéradians, sont également traités dans le SI comme des grandeurs d'unité « un » (voir section 5.4.8). Au besoin, les symboles rad et sr sont écrits explicitement de façon à souligner que la grandeur considérée, pour les radians ou stéradians, est – ou implique – respectivement l'angle plan ou l'angle solide. L'usage des stéradians souligne par exemple la distinction entre les unités de flux et d'intensité en radiométrie et photométrie. Toutefois, c'est une pratique établie de longue date en mathématiques et dans tous les domaines de la science d'utiliser  $\text{rad} = 1$  et  $\text{sr} = 1$ . Pour des raisons historiques, le radian et le stéradian sont traités comme des unités dérivées, tel que décrit dans la section 2.3.4.

Il est particulièrement important de disposer d'une description claire de toute grandeur d'unité « un » (voir section 5.4.7), qui peut s'exprimer comme un rapport de grandeurs de même nature (rapports de longueur, fractions molaires, etc.) ou comme un comptage (nombre de photons, désintégrations, etc.).

### 2.3.4 Unités dérivées

Les unités dérivées sont définies comme des produits de puissances des unités de base. Lorsque le facteur numérique de ce produit est un, 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 terme « cohérent » signifie que les équations reliant les valeurs numériques des grandeurs prennent exactement la même forme que les équations reliant les grandeurs proprement dites.

Certaines unités dérivées cohérentes du SI ont reçu un nom spécial. Le tableau 4 établit la liste des 22 unités ayant un nom spécial. Les sept unités de base (voir tableau 2) et les unités dérivées cohérentes constituent la partie centrale de l'ensemble des unités du SI : toutes les autres unités du SI sont des combinaisons de certaines de ces 29 unités.

Il est important de noter que n'importe laquelle des 7 unités de base et des 22 unités ayant un nom spécial peut être formée directement à partir des sept constantes définissant le SI. En effet, les unités de ces sept constantes incluent à la fois des unités de base et des unités dérivées.

La CGPM a adopté une série de préfixes servant à former des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI cohérentes (voir chapitre 3). Ces préfixes sont pratiques pour exprimer les valeurs de grandeurs beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites que l'unité cohérente. 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 un. Des préfixes peuvent être utilisés avec l'ensemble des 7 unités de base et des 22 unités ayant un nom spécial, à l'exception de l'unité de base « kilogramme », comme expliqué en détail au chapitre 3.

**Tableau 4. Les 22 unités SI ayant un nom spécial et un symbole particulier**

Grandeur dérivée	Nom spécial de l'unité	Expression de l'unité en unités de base <sup>(a)</sup>	Expression de l'unité en d'autres unités SI
angle plan	radian <sup>(b)</sup>	rad = m/m	
angle solide	stéradian <sup>(c)</sup>	sr = m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
fréquence	hertz <sup>(d)</sup>	Hz = s <sup>-1</sup>	
force	newton	N = kg m s <sup>-2</sup>	
pression, contrainte	pascal	Pa = kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup>	
énergie, travail, quantité de chaleur	joule	J = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	N m
puissance, flux énergétique	watt	W = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>	J/s
charge électrique	coulomb	C = A s	
différence de potentiel électrique <sup>(e)</sup>	volt	V = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	W/A
capacité électrique	farad	F = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	C/V
résistance électrique	ohm	Ω = kg m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>	V/A
conductance électrique	siemens	S = kg <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>	A/V
flux d'induction magnétique	weber	Wb = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	V s
induction magnétique	tesla	T = kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>	Wb/m <sup>2</sup>
inductance	henry	H = kg m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	Wb/A
température Celsius	degré Celsius <sup>(f)</sup>	°C = K	
flux lumineux	lumen	lm = cd sr <sup>(g)</sup>	cd sr
éclairage lumineux	lux	lx = cd sr m <sup>-2</sup>	lm/m <sup>2</sup>
activité d'un radionucléide <sup>(d, h)</sup>	becquerel	Bq = s <sup>-1</sup>	
dose absorbée, kerma	gray	Gy = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
équivalent de dose	sievert <sup>(i)</sup>	Sv = m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>	J/kg
activité catalytique	katal	kat = mol s <sup>-1</sup>	

(a) L'ordre des symboles des unités de base dans le tableau 4 est différent de celui utilisé dans la 8<sup>e</sup> édition de la Brochure sur le SI par suite à la décision prise par le CCU à sa 21<sup>e</sup> réunion (2013) de revenir à l'ordre originel défini dans la Résolution 12 adoptée par la CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (1960), selon laquelle le newton est noté : kg m s<sup>-2</sup>, le joule : kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> et J s : kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. L'objectif est de refléter les principes physiques sous-jacents aux équations correspondantes des grandeurs bien que, pour certaines unités dérivées plus complexes, cela puisse s'avérer impossible.

(b) Le radian est l'unité cohérente d'angle plan. Un radian est un angle compris entre deux rayons d'un cercle qui, sur la circonférence du cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon. Le radian est aussi l'unité d'angle de phase. Pour les phénomènes périodiques, l'angle de phase augmente de 2π rad à chaque période. Le radian était auparavant une unité SI supplémentaire mais cette catégorie a été supprimée en 1995.

(c) Le stéradian est l'unité cohérente d'angle solide. Un stéradian est un angle solide d'un cône qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté une longueur égale au rayon de la sphère. Comme le radian, le stéradian était auparavant une unité SI supplémentaire.

(d) Le hertz ne doit être utilisé que pour les phénomènes périodiques et le becquerel que pour les processus aléatoires liés à la mesure de l'activité d'un radionucléide.

- (e) La différence de potentiel électrique est également appelée « tension » ou « tension électrique » dans certains pays.
- (f) Le degré Celsius est utilisé pour exprimer des températures Celsius. 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.
- (g) En photométrie, on maintient généralement le nom et le symbole du stéradian, sr, dans l'expression des unités.
- (h) L'activité d'un radionucléide est parfois appelée de manière incorrecte radioactivité.
- (i) Voir la Recommandation 2 du CIPM sur l'utilisation du sievert (PV, 2002, **70**, 102).

Les 7 unités de base et les 22 unités ayant un nom spécial et un symbole particulier peuvent être combinées pour exprimer des unités d'autres grandeurs dérivées. Étant donné le nombre illimité de grandeurs, il n'est pas possible de fournir une liste complète des grandeurs et unités dérivées. Le tableau 5 présente un certain nombre d'exemples de grandeurs dérivées, avec les unités dérivées cohérentes correspondantes exprimées en unités de base. En outre, le tableau 6 présente des exemples d'unités dérivées cohérentes dont les noms et symboles comprennent également des unités dérivées. L'ensemble des unités SI comprend l'ensemble des unités cohérentes et les multiples et sous-multiples formés à l'aide de préfixes SI.

**Tableau 5. Exemples d'unités dérivées cohérentes du SI exprimées à partir des unités de base**

Grandeur dérivée	Symbole caractéristique de la grandeur	Unité dérivée exprimée en unités de base
superficie	$A$	$m^2$
volume	$V$	$m^3$
vitesse	$v$	$m\ s^{-1}$
accélération	$a$	$m\ s^{-2}$
nombre d'ondes	$\sigma$	$m^{-1}$
masse volumique	$\rho$	$kg\ m^{-3}$
masse surfacique	$\rho_A$	$kg\ m^{-2}$
volume massique	$v$	$m^3\ kg^{-1}$
densité de courant	$j$	$A\ m^{-2}$
champ magnétique	$H$	$A\ m^{-1}$
concentration de quantité de matière	$c$	$mol\ m^{-3}$
concentration massique	$\rho, \gamma$	$kg\ m^{-3}$
luminance lumineuse	$L_v$	$cd\ m^{-2}$

**Tableau 6. Exemples d'unités dérivées cohérentes du SI dont le nom et le symbole comprennent des unités dérivées cohérentes du SI ayant un nom spécial et un symbole particulier**

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

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.

Toutefois, l'inverse n'est pas vrai car, de façon générale, la même unité SI peut être employée pour exprimer différentes grandeurs. Par exemple, le joule par kelvin est le nom de l'unité SI pour la grandeur « capacité thermique » et pour la grandeur « entropie ». De même, l'ampère est le nom de l'unité SI pour la grandeur de base « courant électrique » et pour la grandeur dérivée « force magnétomotrice ». Il est important de remarquer qu'il ne suffit pas 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 (en effet, ces derniers doivent afficher non seulement l'unité mais aussi la grandeur mesurée).

En pratique on exprime l'unité de certaines grandeurs en employant de préférence un nom spécial afin de réduire le risque de confusion entre des grandeurs différentes ayant la même dimension. Dans ce cas, on peut rappeler comment la grandeur est définie. Par exemple, la grandeur « couple » est le produit vectoriel d'un vecteur position et d'un vecteur force : son unité SI est le « newton mètre ». Bien que le couple ait la même dimension que l'énergie (exprimée en unité SI « joule »), le joule n'est jamais utilisé pour exprimer un couple.

L'unité SI de fréquence est le hertz, l'unité SI de vitesse angulaire et de fréquence angulaire est le radian par seconde, et l'unité SI d'activité est le becquerel : toutes impliquent un comptage 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. Il est particulièrement important de distinguer les fréquences des fréquences angulaires car leurs valeurs numériques diffèrent par définition d'un facteur<sup>1</sup> de  $2\pi$ . Ignorer cela peut provoquer une erreur de  $2\pi$ . On remarque que dans certains pays les valeurs de fréquence sont exprimées par convention à l'aide de « cycle/s » ou « cps » au lieu de l'unité SI « Hz », bien que « cycle » et « cps » ne soient pas des unités du SI. On remarque également qu'il est courant, bien que cela ne soit pas recommandé, d'utiliser le terme « fréquence » pour des grandeurs exprimées en rad/s. De ce fait, il est recommandé de toujours exprimer les grandeurs « fréquence », « fréquence angulaire » et « vitesse angulaire » de façon explicite en Hz ou rad/s mais pas en  $s^{-1}$ .

Dans le domaine des rayonnements ionisants, l'unité SI utilisée est le becquerel plutôt que la seconde moins un, et les unités SI « gray » et « sievert » plutôt que le joule par kilogramme pour, respectivement, la dose absorbée et l'équivalent de dose. Les noms spéciaux « becquerel », « gray » et « sievert » ont été introduits 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 utilisées à tort pour expliciter ces grandeurs.

L'expression de températures ou de différences de température requiert une attention particulière. Une différence de température de 1 K équivaut à une différence de température de 1 °C mais il faut prendre en considération la différence de 273,15 K pour exprimer une température thermodynamique. L'unité degré Celsius n'est cohérente que lorsqu'elle est utilisée pour exprimer des différences de température.

La Commission électrotechnique internationale (IEC) a introduit le var (symbole : var) comme nom spécial pour l'unité de puissance réactive. Exprimé en unités SI cohérentes, le var est identique au volt ampère.

### 2.3.5 Unités des grandeurs décrivant des effets biologiques et physiologiques

Quatre des unités du SI listées dans les tableaux 2 et 4 incluent des coefficients physiologiques de pondération : il s'agit de la candela, du lumen, du lux et du sievert.

Le lumen et le lux sont dérivés de l'unité de base « candela ». Comme la candela, ils donnent des informations sur la vision humaine. La candela a été adoptée comme unité de base en 1954 afin de reconnaître l'importance de la lumière dans la vie courante. De plus amples informations sur les unités et les conventions utilisées pour définir des grandeurs photochimiques et photobiologiques sont données dans l'Annexe 3.

<sup>1</sup> Voir la norme ISO 80000-3 pour de plus amples détails.

Les rayonnements ionisants déposent de l'énergie dans la matière irradiée. Le rapport entre l'énergie déposée et la masse est appelé « dose absorbée »,  $D$ . Conformément à la décision prise par le CIPM en 2002 la grandeur « équivalent de dose »  $H = Q D$  est le produit de la dose absorbée  $D$  et du facteur numérique de qualité  $Q$ , qui prend en compte l'efficacité biologique du rayonnement et qui dépend de l'énergie et du type de rayonnement.

Il existe des unités de grandeurs décrivant des effets biologiques et impliquant des facteurs de pondération qui ne sont pas des unités SI. On peut citer deux exemples.

Le son cause des 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 mais ne suit pas une relation simple, ni en fonction de l'amplitude des variations de pression, ni en fonction de la fréquence. Par conséquent, des grandeurs pondérées en fonction de la fréquence sont utilisées en acoustique pour donner une approximation de la manière dont le son est perçu. Elles sont par exemple utilisées pour des mesures concernant la protection contre les dommages auditifs. L'effet des ondes acoustiques ultrasonores est source de préoccupations similaires dans le diagnostic médical et dans le domaine thérapeutique.

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. Cette absence de définition est due au mécanisme de l'effet biologique spécifique à ces substances qui 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.

### 2.3.6 Les unités SI dans le cadre de la théorie de la relativité générale

La réalisation pratique d'une unité et le processus de comparaison requièrent un ensemble d'équations dans le cadre d'une description théorique. Dans certains cas, ces équations comprennent des effets relativistes.

Pour les étalons de fréquence, il est possible de conduire des 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, un décalage de fréquence entre les étalons d'environ  $1 \times 10^{-16}$  en valeur relative par mètre d'altitude à la surface de la Terre. Des effets de cet ordre de grandeur doivent être corrigés lors de la comparaison des meilleurs étalons de fréquence.

Lorsque des réalisations pratiques sont comparées au niveau local, c'est-à-dire dans une zone spécifique de l'espace-temps, les effets liés à la courbure de l'espace-temps décrits par la théorie de la relativité générale peuvent être négligés. Si des réalisations ont les mêmes coordonnées dans l'espace-temps (par exemple, même trajectoire et même accélération ou même champ gravitationnel), les effets relativistes peuvent être complètement ignorés.



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

Des multiples et sous-multiples décimaux de  $10^{24}$  à  $10^{-24}$  peuvent être utilisés avec les unités SI. Les noms et les symboles des préfixes adoptés pour former les noms et symboles des multiples et sous-multiples décimaux des unités sont présentés dans le tableau 7.

Les symboles des préfixes sont écrits en caractères romains, comme les symboles d'unités, quelle que soit la police utilisée dans le reste du texte ; ils sont attachés aux symboles d'unités, sans espace entre le symbole du préfixe et celui de l'unité. À l'exception des symboles 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.

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 noms et symboles recommandés pour les préfixes correspondant à des puissances de 2 sont les suivants :

kibi	Ki	$2^{10}$
mébi	Mi	$2^{20}$
gibi	Gi	$2^{30}$
tébi	Ti	$2^{40}$
pébi	Pi	$2^{50}$
exbi	Ei	$2^{60}$
zébi	Zi	$2^{70}$
yobi	Yi	$2^{80}$

**Tableau 7. Préfixes du 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	$\mu$
$10^9$	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

Le groupe formé par le symbole d'un préfixe attaché au symbole d'une unité constitue un nouveau symbole d'unité inséparable (indiquant 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 :* pm (picomètre), mmol (millimole), G $\Omega$  (gigaohm), THz (terahertz)

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

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

De même, les noms de préfixes ne sont pas séparés des noms d'unités auxquels ils sont attachés. 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.

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 kilogramme est la seule unité SI cohérente dont le nom et le symbole, pour des raisons historiques, contiennent 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 ». Ainsi,  $10^{-6}$  kg s'écrit milligramme, mg, et non microkilogramme,  $\mu$ kg.

## 4 Unités en dehors du SI dont l'usage est accepté avec le SI

Le SI fournit les unités de référence approuvées au niveau international en fonction desquelles toutes les autres unités sont définies. Les unités SI cohérentes ont l'avantage considérable de ne pas nécessiter de conversions d'unités quand on attribue des valeurs particulières aux grandeurs dans les équations aux grandeurs.

Il est néanmoins reconnu que certaines unités en dehors du SI sont très utilisées et continueront selon toute vraisemblance à l'être pendant de nombreuses années. C'est la raison pour laquelle le CIPM a accepté que certaines unités en dehors du SI soient utilisées avec le SI : elles sont répertoriées dans le tableau 8. Lorsque ces unités sont utilisées, il faut bien comprendre que l'on perd certains avantages du SI. Les préfixes du SI peuvent être utilisés avec plusieurs de ces unités mais cela n'est pas possible, par exemple, avec les unités de temps en dehors du SI.

**Tableau 8. 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	h	1 h = 60 min = 3600 s
	jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
longueur	unité astronomique <sup>(a)</sup>	au	1 au = 149 597 870 700 m
angle plan et de phase	degré	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad
	minute	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\,800$ ) rad
	seconde <sup>(b)</sup>	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\,000$ ) rad
superficie	hectare <sup>(c)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
volume	litre <sup>(d)</sup>	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
masse	tonne <sup>(e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
	dalton <sup>(f)</sup>	Da	1 Da = 1,660 539 066 60(50) × 10 <sup>-27</sup> kg
énergie	électronvolt <sup>(g)</sup>	eV	1 eV = 1,602 176 634 × 10 <sup>-19</sup> J
logarithme d'un rapport	néper <sup>(h)</sup>	Np	voir notes de bas de page
	bel <sup>(h)</sup>	B	
	décibel <sup>(h)</sup>	dB	

Le gal, symbole Gal, est une unité en dehors du SI utilisée en géodésie et géophysique pour exprimer l'accélération due à la pesanteur.

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$$

(a) Décision de la XXVIII<sup>e</sup> Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (Résolution B2, 2012).

(b) En astronomie, les petits angles sont mesurés en secondes d'arc (c'est-à-dire en secondes d'angle plan), symbole as ou ", et en milliarcsecondes, microarcsecondes et picoarcsecondes, de symboles respectifs mas,  $\mu$ as et pas, l'arcseconde étant un autre nom pour la seconde d'angle plan.

(c) L'unité hectare et son symbole ha ont été adoptés par le CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). L'hectare est utilisé pour exprimer des superficies agraires.

(d) Le litre et son symbole l (en minuscule) ont été adoptés par le CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). Le symbole L (en majuscule) a été adopté par la CGPM à sa 16<sup>e</sup> réunion (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.

- (e) La tonne et son symbole t ont été adoptés par le CIPM en 1879 (PV, 1879, 41). Dans les pays de langue anglaise, cette unité est généralement désignée sous le nom « tonne métrique ».
  - (f) 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  $^{12}\text{C}$  libre, au repos et dans son état fondamental. Cette valeur du dalton est la valeur recommandée dans l'ajustement de 2018 de CODATA.
  - (g) 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 du SI.
  - (h) 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.
- 

Le tableau 8 mentionne aussi les unités des grandeurs logarithmiques, le néper, le bel et le décibel. Elles sont utilisées pour véhiculer des informations sur la nature du logarithme d'un rapport de grandeurs. Le néper, Np, est utilisé pour exprimer la valeur de grandeurs dont la valeur numérique est un logarithme néperien (ou naturel) d'un rapport 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 grandeurs dont la valeur numérique est un logarithme de base 10 d'un rapport de grandeurs,  $\lg = \log_{10}$ . L'égalité  $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$  (où  $m$  est un nombre) est comprise comme signifiant que  $m = 10 \lg(X/X_0)$ . L'usage des unités néper, bel et décibel avec le SI a été accepté par le CIPM mais ces unités ne sont pas des unités du SI.

Il existe de nombreuses autres unités en dehors du SI qui présentent 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 CIPM 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.

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

### 5.1 Utilisation des symboles et noms des unités

Les principes généraux concernant l'écriture des symboles des unités et des nombres furent d'abord proposés par la CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion (1948, Résolution 7). Ils furent ensuite adoptés et mis en forme par l'ISO, l'IEC et d'autres organisations internationales. Il existe donc un consensus général sur la manière dont doivent être exprimés les symboles et noms d'unités, y compris les symboles et noms de préfixes, ainsi que les symboles et les valeurs des grandeurs. Le respect de ces règles et des conventions de style, dont les plus importantes sont présentées dans ce chapitre, aide à la lisibilité et à la clarté des résultats numériques exprimés en unités SI.

### 5.2 Symboles des unités

Les symboles des unités sont imprimés en caractères 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 en majuscule.

Le symbole du litre constitue une exception à cette règle. La CGPM à sa 16<sup>e</sup> réunion (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.

Si l'on utilise un préfixe de multiple ou sous-multiple, celui-ci fait partie de l'unité et 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 préfixe composé.

Les symboles d'unités sont des entités mathématiques et non des abréviations. Par conséquent, ils ne doivent 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 d'unités avec des noms d'unités dans une même expression puisque les noms ne sont pas des entités mathématiques.

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 une 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 en utilisant par exemple des crochets, 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.

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<sup>2</sup> ou millimètre carré), cc (pour cm<sup>3</sup> ou centimètre cube), ou mps (pour m/s ou mètre par seconde). L'utilisation correcte des symboles des unités du 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.

## 5.3 Noms des unités

Les noms des unités sont imprimés en caractères 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 plus 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 du préfixe et de celui de l'unité constitue un seul mot (voir aussi chapitre 3).

Lorsque le nom d'une unité dérivée est constitué par juxtaposition de noms d'unités individuelles, il convient d'utiliser une espace ou un tiret pour séparer chaque nom d'unité.

## 5.4 Règles et conventions stylistiques servant à exprimer les valeurs des grandeurs

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

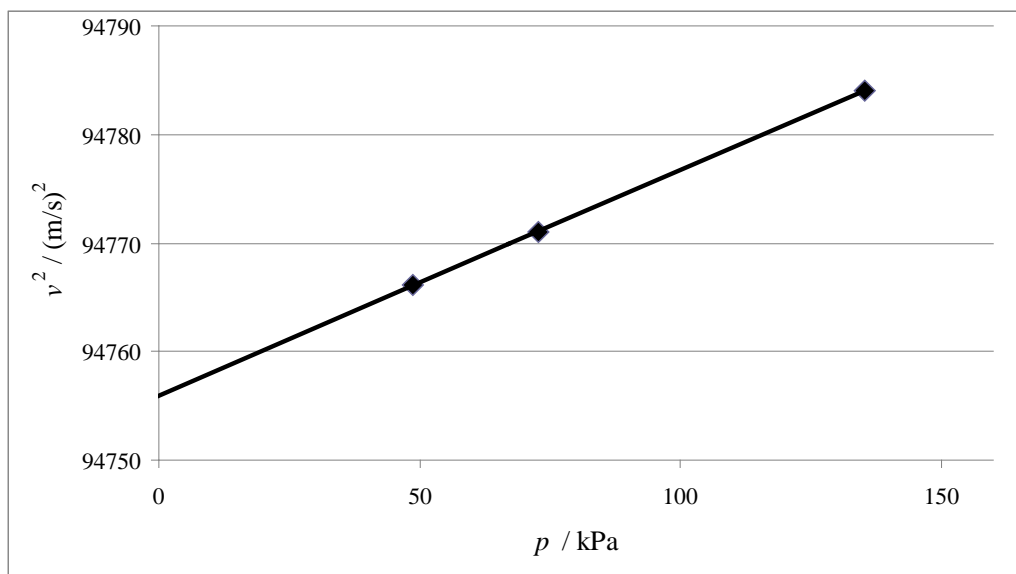
Les symboles des grandeurs sont en général formés d'une seule lettre en italique mais des informations complémentaires sur la grandeur peuvent être précisées par un indice ou un exposant ajouté au symbole ou au moyen de parenthèses. Par exemple,  $C$  est le symbole recommandé pour la capacité thermique,  $c_m$  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.

Les noms et symboles recommandés pour les grandeurs figurent dans de nombreux ouvrages de référence, tels que la série de normes ISO/IEC 80000 « *Grandeurs et unités* », le « livre rouge » de l'IUPAP SUNAMCO intitulé « *Symbols, Units and Nomenclature in Physics* » et le « livre vert » de l'IUPAC intitulé « *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 certaines circonstances, 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 applique les principes du calcul formel ou de l'algèbre des grandeurs. Par exemple l'équation  $p = 48 \text{ kPa}$  peut aussi s'écrire  $p/\text{kPa} = 48$ . Il est courant d'écrire 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 vitesse au carré en fonction d'une pression peut prendre la forme suivante :

$p/\text{kPa}$	$v^2/(\text{m/s})^2$
48,73	94766
72,87	94771
135,42	94784

Les axes d'un graphique peuvent aussi être identifiés de cette manière, afin que les graduations soient uniquement identifiées par des nombres, comme illustré sur la figure ci-dessous.



#### 5.4.2 Symboles des grandeurs et unités

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 non à celui de l'unité.

Par exemple, 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  
 $1,3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ .

### 5.4.3 Écriture de la valeur d'une grandeur

La valeur numérique précède toujours l'unité et il y a toujours une espace entre le nombre et l'unité. Ainsi, la valeur d'une grandeur étant le produit d'un nombre par une unité, l'espace entre le nombre et l'unité est considérée 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 (respectivement °, ' et ") pour lesquels il n'y a pas d'espace entre la valeur numérique et le symbole de l'unité.

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

En anglais, même lorsque la valeur d'une grandeur est utilisée comme adjectif, il convient de laisser une 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 149).

Dans une expression donnée, une seule unité doit être utilisée. 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, il est préférable d'écrire 22,20° plutôt que 22° 12', sauf dans les domaines tels que la navigation, la cartographie, l'astronomie et la mesure d'angles très petits.

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

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

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

### 5.4.4 Écriture des nombres et séparateur décimal

Le symbole utilisé pour séparer le nombre entier de sa partie décimale est appelé « séparateur décimal ». Conformément à la décision de la CGPM à sa 22<sup>e</sup> réunion (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 selon la langue concernée et le contexte.

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

Conformément à la décision de la CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion (1948, Résolution 7) et à sa 22<sup>e</sup> réunion (2003, Résolution 10), les nombres comportant un grand nombre de chiffres peuvent être partagés en tranches de trois chiffres, séparées par une 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 une espace. L'habitude de grouper ainsi les 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.

Le format utilisé pour écrire les nombres dans un tableau doit rester cohérent dans une même colonne.

-0,234  
mais pas  
-,234

43 279,168 29  
mais pas  
43.279,168.29

3279,1683  
ou 3 279,168 3

### 5.4.5 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 JCGM 100:2008 (GUM 1995 avec des corrections mineures), *Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. L'incertitude-type associée à une grandeur  $x$  est désignée par  $u(x)$ . Un moyen commode de représenter l'incertitude-type est donné dans l'exemple suivant :



$$m_n = 1,674\,927\,471\,(21) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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 sur les deux derniers chiffres de la valeur estimée de  $m_n$ , dans le cas présent :  $u(m_n) = 0,000\,000\,021 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . Si une incertitude élargie  $U(x)$  est utilisée au lieu de l'incertitude-type  $u(x)$ , alors la probabilité d'élargissement  $p$  et le facteur d'élargissement  $k$  doivent être précisés.

#### 5.4.6 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 un signe de multiplication  $\times$ , des parenthèses (ou des crochets), mais pas le point (centré) à mi-hauteur. 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  $a/b/c$

#### 5.4.7 Écriture des valeurs des grandeurs exprimées par des nombres

Comme mentionné dans la section 2.3.3, les valeurs des grandeurs d'unité « un » sont simplement exprimées par des nombres. Le symbole d'unité, 1, ou le nom d'unité « un » ne sont pas écrits explicitement. Comme les symboles de préfixes du 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 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 »

Les grandeurs qui sont des rapports de grandeurs de même nature (rapports de longueur, fractions molaires, etc.) peuvent être exprimées avec des unités (m/m, mol/mol) afin de faciliter la compréhension de la grandeur exprimée et afin de permettre l'utilisation de préfixes du SI, si cela est préférable ( $\mu\text{m/m}$ ,  $\text{nmol/mol}$ ). Cela n'est pas possible avec les grandeurs de comptage qui sont simplement des nombres.

Le symbole % (pour cent), qui est internationalement reconnu, peut être utilisé avec le SI. Quand il est utilisé, il convient de mettre une espace entre le nombre et le symbole %. Il est préférable d'utiliser le symbole % plutôt que le nom « pour cent ». Dans un texte écrit, le symbole % signifie en général « parties par centaine ». 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.

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.

Le terme « ppm », qui signifie  $10^{-6}$  en valeur relative ou  $1 \times 10^{-6}$  ou « parties par million », est également utilisé. L'expression est analogue à « pour cent » dans le sens de parties par centaine. Les termes « partie par milliard » et « partie par millier de milliards » [billion (États-Unis)/trillion (Royaume-Uni)] et leur abréviation respective « ppb » et « ppt » sont également utilisés mais comme leur signification varie selon la langue, il est préférable d'éviter de les employer.

### 5.4.8 Angles plans, angles solides et angles de phase

L'unité cohérente du SI pour l'angle plan et l'angle de phase est le radian, symbole rad, et celle de l'angle solide est le stéradian, symbole sr.

Lorsqu'il est exprimé en radian, l'angle plan entre deux lignes partant d'un point commun est la longueur de l'arc circulaire  $s$  balayée entre ces lignes par un vecteur rayon de longueur  $r$  depuis le point commun, divisée par la longueur du vecteur rayon,  $\theta = s/r$  rad. L'angle de phase (communément appelé « phase ») est l'argument de tout nombre complexe. C'est l'angle entre l'axe réel positif et le rayon de la représentation polaire du nombre complexe dans le plan complexe.

Un radian correspond à l'angle pour lequel  $s = r$ , ainsi  $1 \text{ rad} = 1$ . La mesure de l'angle droit est exactement égale au nombre  $\pi/2$ .

Le degré est une convention historique. La conversion entre radians et degrés découle de la relation  $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ . On remarque que le degré, symbole  $^\circ$ , n'est pas une unité du SI.

L'angle solide, exprimé en stéradian, correspond au rapport entre l'aire  $A$  de la surface d'une sphère de rayon  $r$  et le rayon au carré,  $\Omega = A/r^2$  sr. Un stéradian correspond à l'angle solide pour lequel  $A = r^2$ , ainsi  $1 \text{ sr} = 1$ .

Les unités rad et sr correspondent respectivement aux rapports de deux longueurs et de deux longueurs au carré. Toutefois, les unités rad et sr ne doivent être utilisées que pour exprimer des angles et des angles solides, et non des rapports de longueurs ou de longueurs au carré en général.

Lorsque le SI a été adopté par la CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion en 1960, la classe des « unités supplémentaires » a été créée afin d'inclure le radian et le stéradian. Des décennies plus tard, la CGPM a décidé :  
(1) « 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  
(2) de supprimer la classe des unités supplémentaires en tant que classe séparée dans le SI (Résolution 8 adoptée par la CGPM à sa 20<sup>e</sup> réunion (1995)).

## **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 des poids et mesures (CGPM) et du Comité international des poids et mesures (CIPM) 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 CGPM et du CIPM. 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, 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 CGPM et du CIPM figurent dans cette annexe par ordre chronologique, de 1889 à 2018, afin de préserver la continuité. Cependant, afin de pouvoir identifier facilement les décisions concernant un domaine particulier, une table des matières par sujet indique les réunions pendant lesquelles ces décisions ont été adoptées et donne les numéros des pages où sont reproduites les publications originelles.

## Table des matières de l'annexe 1

<b>Décisions concernant l'établissement du SI</b>		<b>page</b>
9 <sup>e</sup> CGPM, 1948 :	décision d'établir le SI	<b>50</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	décision d'adopter les six premières unités de base	<b>52</b>
CIPM 1956 :	décision d'adopter le nom Système international d'unités	<b>53</b>
11 <sup>e</sup> CGPM, 1960 :	confirmation du nom et de l'abréviation SI, noms des préfixes téra à pico, établissement des unités supplémentaires rad et sr, établissement de la liste de certaines unités dérivées	<b>54</b>
CIPM, 1969 :	déclarations concernant les unités de base, supplémentaires, dérivées et cohérentes, et utilisation des préfixes	<b>60</b>
CIPM, 2001 :	« unités SI » et « unités du SI »	<b>72</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI)	<b>80</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>82</b>
25 <sup>e</sup> CGPM, 2014 :	révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>89</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019)	<b>92</b>
 <b>Décisions concernant les unités de base du SI</b>		
<b>Longueur</b>		
1 <sup>re</sup> CGPM, 1889 :	sanction du Prototype du mètre	<b>47</b>
7 <sup>e</sup> CGPM, 1927 :	définition du mètre par le Prototype international	<b>48</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	adoption du mètre comme unité de base	<b>52</b>
11 <sup>e</sup> CGPM, 1960 :	redéfinition du mètre au moyen de la radiation du krypton 86	<b>53</b>
15 <sup>e</sup> CGPM, 1975 :	recommandation de la valeur de la vitesse de la lumière	<b>62</b>
17 <sup>e</sup> CGPM, 1983 :	redéfinition du mètre en fonction de la vitesse de la lumière, mise en pratique de la définition du mètre	<b>66</b>
CIPM, 2002 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre	<b>72</b>
CIPM, 2003 :	révision de la liste des radiations recommandées	<b>75</b>
CIPM, 2005 :	révision de la liste des radiations recommandées	<b>77</b>
CIPM, 2007 :	révision de la liste des radiations recommandées	<b>79</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre et mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence	<b>79</b>
CIPM, 2009 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons	<b>82</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>82</b>

	<b>page</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre et mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence <b>87</b>
CIPM, 2013 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons <b>87</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) <b>92</b> (mise en œuvre le 20 mai 2019)

### **Masse**

1 <sup>re</sup> CGPM, 1889 :	sanction du Prototype du kilogramme <b>47</b>
3 <sup>e</sup> CGPM, 1901 :	déclaration au sujet de la différence entre masse et poids, et valeur conventionnelle de $g_n$ <b>48</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	adoption du kilogramme comme unité de base <b>52</b>
CIPM, 1967 :	déclaration sur les préfixes du gramme <b>57</b>
21 <sup>e</sup> CGPM, 1999 :	redéfinition éventuelle du kilogramme <b>71</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI) <b>80</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI <b>82</b>
25 <sup>e</sup> CGPM, 2014 :	révision à venir du Système international d'unités, le SI <b>89</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) <b>92</b> (mise en œuvre le 20 mai 2019)

### **Temps**

10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	adoption de la seconde comme unité de base <b>52</b>
CIPM, 1956 :	définition de la seconde comme la fraction de l'année tropique 1900 <b>52</b>
11 <sup>e</sup> CGPM, 1960 :	ratification de la définition de la seconde donnée par le CIPM en 1956 <b>54</b>
CIPM, 1964 :	déclaration selon laquelle l'étalon à employer est la transition hyperfine du césium 133 <b>56</b>
12 <sup>e</sup> CGPM, 1964 :	pouvoir au CIPM de désigner les étalons de fréquence atomique et moléculaire à employer <b>56</b>
13 <sup>e</sup> CGPM, 1967/68 :	définition de la seconde au moyen de la transition du césium <b>58</b>
CCDS, 1970 :	définition du Temps atomique international, TAI <b>61</b>
14 <sup>e</sup> CGPM, 1971 :	demande au CIPM de définir et d'établir le Temps atomique international, TAI <b>61</b>
15 <sup>e</sup> CGPM, 1975 :	sanction du Temps universel coordonné, UTC <b>62</b>
CIPM, 2006 :	représentations secondaires de la seconde <b>78</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre et mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence <b>79</b>
CIPM, 2009 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons <b>82</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI <b>82</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	révision de la mise en pratique de la définition du mètre et mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence <b>87</b>

	<b>page</b>
CIPM, 2013 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons <b>87</b>
CIPM, 2015 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons <b>90</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019) <b>92</b>
 <b>Unités électriques</b>	
CIPM, 1946 :	définition des unités électriques cohérentes dans le système d'unités MKS (mètre-kilogramme-seconde) (mise en œuvre le 1 <sup>er</sup> janvier 1948) <b>49</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	adoption de l'ampère comme unité de base <b>52</b>
14 <sup>e</sup> CGPM, 1971 :	adoption du nom siemens, symbole S, pour la conductance électrique <b>61</b>
18 <sup>e</sup> CGPM, 1987 :	ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm <b>67</b>
CIPM, 1988 :	définition de la valeur conventionnelle de la constante de Josephson (mise en œuvre le 1 <sup>er</sup> janvier 1990) <b>68</b>
CIPM, 1988 :	définition de la valeur conventionnelle de la constante de von Klitzing (mise en œuvre le 1 <sup>er</sup> janvier 1990) <b>69</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI) <b>80</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 :	éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI <b>82</b>
25 <sup>e</sup> CGPM, 2014 :	révision à venir du Système international d'unités, le SI <b>89</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019) <b>92</b>
 <b>Température thermodynamique</b>	
9 <sup>e</sup> CGPM, 1948 :	adoption du point triple de l'eau comme point de référence pour la température thermodynamique, adoption du degré Celsius, et définition du zéro comme étant la température de référence inférieure de 0,01 degré à celle du point triple de l'eau <b>49</b>
CIPM, 1948 :	adoption du nom degré Celsius pour l'échelle de température Celsius <b>50</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	définition de la température thermodynamique du point triple de l'eau à 273,16 degrés Kelvin exactement, définition de l'atmosphère normale <b>52</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 :	adoption du degré Kelvin comme unité de base <b>52</b>
13 <sup>e</sup> CGPM, 1967/68 :	définition officielle du kelvin, symbole K <b>58</b>
CIPM, 1989 :	Échelle internationale de température de 1990, EIT-90 <b>69</b>
CIPM, 2005 :	note ajoutée à la définition du kelvin à propos de la composition isotopique de l'eau <b>76</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	clarification de la définition du kelvin, unité de température thermodynamique <b>80</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 :	éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI) <b>80</b>

	<b>page</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 : éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>82</b>
25 <sup>e</sup> CGPM, 2014 : révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>89</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 : révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019)	<b>92</b>

#### **Quantité de matière**

14 <sup>e</sup> CGPM, 1971 : définition de la mole, symbole mol, comme 7 <sup>e</sup> unité de base, et règles d'utilisation	<b>62</b>
21 <sup>e</sup> CGPM, 1999 : adoption du nom spécial katal, kat	<b>71</b>
23 <sup>e</sup> CGPM, 2007 : éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI)	<b>80</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 : éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>82</b>
25 <sup>e</sup> CGPM, 2014 : révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>89</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 : révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019)	<b>92</b>

#### **Intensité lumineuse**

CIPM, 1946 : définition des unités photométriques, bougie nouvelle et lumen nouveau (mise en œuvre le 1 <sup>er</sup> janvier 1948)	<b>48</b>
10 <sup>e</sup> CGPM, 1954 : adoption de la candela comme unité de base	<b>52</b>
13 <sup>e</sup> CGPM, 1967/68 : définition de la candela, symbole cd, en fonction du corps noir	<b>59</b>
16 <sup>e</sup> CGPM, 1979 : redéfinition de la candela à partir d'un rayonnement monochromatique	<b>63</b>
24 <sup>e</sup> CGPM, 2011 : éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI	<b>82</b>
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 : révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019)	<b>92</b>

#### **Décisions concernant les unités SI dérivées et les unités supplémentaires**

##### **Unités SI dérivées**

12 <sup>e</sup> CGPM, 1964 : décision d'accepter de continuer à utiliser le curie comme unité en dehors du SI	<b>57</b>
13 <sup>e</sup> CGPM, 1967/68 : exemples d'unités dérivées	<b>59</b>
15 <sup>e</sup> CGPM, 1975 : adoption des noms spéciaux becquerel, Bq, et gray, Gy	<b>63</b>
16 <sup>e</sup> CGPM, 1979 : adoption du nom spécial sievert, Sv	<b>64</b>
CIPM, 1984 : décision de clarifier les relations entre la dose absorbée (unité SI gray) et l'équivalent de dose (unité SI sievert)	<b>67</b>
CIPM, 2002 : modification des relations entre la dose absorbée et l'équivalent de dose	<b>74</b>

<b>Unités supplémentaires</b>		<b>page</b>
CIPM, 1980 :	décision d'interpréter les unités supplémentaires comme des unités dérivées sans dimension	<b>65</b>
20 <sup>e</sup> CGPM, 1995 :	décision de supprimer la classe des unités supplémentaires, et confirmation de l'interprétation du CIPM selon laquelle ce sont des unités dérivées sans dimension	<b>70</b>
 <b>Décisions concernant la terminologie et approbation des unités en usage avec le SI</b>		
<b>Préfixes SI</b>		
12 <sup>e</sup> CGPM, 1964 :	décision d'ajouter femto et atto à la liste des préfixes	<b>57</b>
15 <sup>e</sup> CGPM, 1975 :	décision d'ajouter péta et exa à la liste des préfixes	<b>63</b>
19 <sup>e</sup> CGPM, 1991 :	décision d'ajouter zetta, zepto, yotta et yocto à la liste des préfixes	<b>70</b>
 <b>Symboles d'unités et nombres</b>		
9 <sup>e</sup> CGPM, 1948 :	décision sur les règles d'écriture des symboles d'unités et des nombres	<b>51</b>
 <b>Noms d'unités</b>		
13 <sup>e</sup> CGPM, 1967/68 :	abrogation de l'utilisation du micron et de la bougie nouvelle comme unités en usage avec le SI	<b>60</b>
 <b>Séparateur décimal</b>		
22 <sup>e</sup> CGPM, 2003 :	décision d'autoriser l'usage du point ou de la virgule sur la ligne comme séparateur décimal	<b>75</b>
 <b>Unités en usage avec le SI : un exemple, le litre</b>		
3 <sup>e</sup> CGPM, 1901 :	définition du litre comme le volume d'un 1 kg d'eau	<b>47</b>
11 <sup>e</sup> CGPM, 1960 :	demande au CIPM d'étudier la différence entre le décimètre cube et le litre	<b>55</b>
CIPM, 1961 :	recommandation d'exprimer les volumes en unités SI et non en litres	<b>56</b>
12 <sup>e</sup> CGPM, 1964 :	abrogation de la précédente définition du litre et recommandation d'utiliser le litre comme nom spécial donné au décimètre cube	<b>57</b>
16 <sup>e</sup> CGPM, 1979 :	décision, à titre exceptionnel, d'autoriser les deux symboles L et l pour le litre	<b>64</b>



## 1<sup>re</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 6, voir p. 53).

## 3<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 6, voir p. 57).

### ■ 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.\*\*

\*Définition abrogée en 2018 par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (Résolution 1, voir p.92).

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

## 7<sup>e</sup> 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 CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (Résolution 6, voir p. 53).

## 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 CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion 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<sup>e</sup> CGPM en 1967 (Résolution 5, voir p. 59).

## ■ 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  $2 \times 10^{-7}$  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<sup>e</sup> CGPM en 1948 (CR, 49), qui a en outre adopté le nom newton (Résolution 7) pour l'unité MKS de force.

En 1954, la CGPM à sa 10<sup>e</sup> réunion (Résolution 6 ; voir p. 52) établit un système pratique d'unités de mesure pour les relations internationales. L'ampère fut l'une des unités de base de ce système.

\* Définition de l'ampère abrogée en 2018 par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (Résolution 1, voir p.92).

## 9<sup>e</sup> 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.

Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM, 1967/68 (Résolutions 7 et 3, voir pp. 60 et 58, respectivement), ainsi qu'au litre, 16<sup>e</sup> CGPM, 1979 (Résolution 6, voir p. 64).

Unités	Symboles	Unités	Symboles
• mètre	m	ampère	A
• mètre carré	m <sup>2</sup>	volt	V
• mètre cube	m <sup>3</sup>	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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM en 1967/68 (Résolution 4, voir p. 59) a explicitement défini le kelvin.

\*Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

**■ 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 3, voir p.58).

**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

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

\* Définition abrogée en 1967 par la 13<sup>e</sup> CGPM (Résolution 1, voir p. 58).

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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (1960)].

## 11<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 1, voir p. 66).

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

\* Définition abrogée en 1967 par la 13<sup>e</sup> CGPM (Résolution 1, voir p. 58).

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. »

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

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

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

Le nom et symbole de l'unité de température thermodynamique ont été modifiés par la 13<sup>e</sup> CGPM en 1967 (Résolution 3, voir p. 58).

- 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**

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

Une septième unité de base, la mole, fut adoptée par la 14<sup>e</sup> CGPM en 1971 (Résolution 3, voir p. 62).

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

D'autres préfixes furent adoptés par la 12<sup>e</sup> CGPM en 1964 (Résolution 8, voir p. 57), par la 15<sup>e</sup> CGPM en 1975 (Résolution 10, voir p. 63) et par la 19<sup>e</sup> CGPM en 1991 (Résolution 4, voir p. 70).

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<sup>e</sup> CGPM a abrogé en 1995 la classe des unités supplémentaires dans le SI (Résolution 8, voir p. 70). Ces unités sont maintenant considérées comme des unités dérivées.

**Unités dérivées**

superficie	mètre carré	m <sup>2</sup>	
volume	mètre cube	m <sup>3</sup>	
fréquence	hertz	Hz	1/s
masse volumique (densité)	kilogramme par mètre cube	kg/m <sup>3</sup>	
vitesse	mètre par seconde	m/s	
vitesse angulaire	radian par seconde	rad/s	
accélération	mètre par seconde carrée	m/s <sup>2</sup>	
accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad/s <sup>2</sup>	
force	newton	N	kg · m/s <sup>2</sup>
pression (tension mécanique)	newton par mètre carré	N/m <sup>2</sup>	
viscosité cinématique	mètre carré par seconde	m <sup>2</sup> /s	
viscosité dynamique	newton-seconde par mètre carré	N · s/m <sup>2</sup>	
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 <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>	
éclairage	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>

La 13<sup>e</sup> CGPM en 1967 (Résolution 6, voir p. 59) 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 diffèrent d'environ 28 millièmes,
- 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM en 1975 (Résolution 8, voir p. 63) 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

Préfixe

Symbole

$10^{-15}$

femto

f

$10^{-18}$

atto

a

\* De nouveaux préfixes furent ajoutés par la 15<sup>e</sup> CGPM en 1975 (Résolution 10, voir p. 63).

**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<sup>e</sup> 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.

La formulation de la définition de la seconde a été modifiée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

#### ■ 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<sup>e</sup> 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. 76).

■ **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. 69).

\*Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

■ **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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 3, voir p. 63).

■ **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<sup>e</sup> CGPM en 1975 (Résolution 8, voir p. 63).

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 «  $\mu$  » 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<sup>e</sup> CGPM (1960)** (PV, 37, 30 et *Metrologia*, 1970, 6, 66)\*

\* La 20<sup>e</sup> CGPM a décidé d'abroger en 1995 (Résolution 8, voir p. 70) la classe des unités supplémentaires dans le SI.

**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 » ;

\*\* Le CIPM a approuvé en 2001 une proposition du CCU visant à clarifier la définition des « unités SI » et « unités du SI », voir p. 72.

**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.

## 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<sup>e</sup> CGPM, 1971

### ■ Pascal et siemens (CR, 78)

La 14<sup>e</sup> 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. 61.

## ■ 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<sup>e</sup> 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.

\*\*La mole a été redéfinie par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

## 15<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 4, voir p. 70).

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

**16<sup>e</sup> 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,

La formulation de la définition de la candela a été modifiée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

- 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  $540 \times 10^{12}$  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  $540 \times 10^{12}$  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<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1933, ratifiée par la 9<sup>e</sup> CGPM en 1948, puis amendée par la 13<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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. 67).

**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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM (Résolution 8, voir p. 70).

17<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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,

## 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,
- 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.

La formulation de la définition du mètre a été modifiée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

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

Voir Recommandation 1 (CI-2002) du CIPM relative à la révision de la mise en pratique de la définition du mètre, p. 72.

## CIPM, 1984

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

\* 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. 74).

## 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<sup>e</sup> 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  $H$ .

18<sup>e</sup> 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<sup>er</sup> janvier 1990.

## CIPM, 1988

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

\*La CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92) a abrogé l'adoption d'une valeur conventionnelle de  $K_J$ .

## Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures

**agissant** conformément aux instructions données dans la Résolution 6 de la 18<sup>e</sup> 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  $4 \times 10^{-7}$  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<sup>er</sup> 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  $8 \times 10^{-6}$  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)\*

Lors de sa 89<sup>e</sup> session en 2000, le CIPM a approuvé la déclaration de la 22<sup>e</sup> session du CCEM concernant la valeur de la constante de von Klitzing.

**Recommandation 2**

Le Comité international des poids et mesures,

**agissant** conformément aux instructions données dans la Résolution 6 de la 18<sup>e</sup> 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  $25\,812,807\,\Omega$  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  $2 \times 10^{-7}$  en valeur relative et dont la reproductibilité est nettement meilleure,

\*La CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92) a abrogé l'adoption d'une valeur conventionnelle de  $R_K$ .

**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<sup>er</sup> 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 œuvre 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.

**CIPM, 1989**

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

Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

**Recommandation 5**

Le Comité international des poids et mesures (CIPM), conformément à l'invitation formulée par la 18<sup>e</sup> 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<sup>er</sup> janvier 1990,
- et que, à la même date, l'EIPT-68 et l'EPT-76 soient abrogées.

19<sup>e</sup> CGPM, 1991

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

**Résolution 4**

La 19<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM, Résolution 12, paragraphe 3, la 12<sup>e</sup> CGPM, Résolution 8 et la 15<sup>e</sup> CGPM, Résolution 10, les préfixes suivants :

Facteur par lequel

l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10 <sup>21</sup>	zetta	Z
10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>24</sup>	yotta	Y
10 <sup>-24</sup>	yocto	y

Les noms zepto et zetta évoquent le chiffre sept (septième puissance de 10<sup>3</sup>) 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<sup>3</sup>) ; 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<sup>e</sup> CGPM, 1995

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

**Résolution 8**

La 20<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

**considérant**

- que la 11<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> CGPM, 1999****■ La définition du kilogramme (CR, 141-142 et *Metrologia*, 2000, 37, 94)****Résolution 7**

La 21<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> Conférence générale, 1975, Résolutions 8 et 9, 16<sup>e</sup> 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, 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, 90-101 et *Metrologia*, 40, 103-133)

#### Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures,

#### **rappelant**

- qu'en 1983 la 17<sup>e</sup> 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  $\lambda$  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  $1 \times 10^{-16}$  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  $\text{Hg}^+$ , de l'ion piégé d' $\text{In}^+$ , et de l'ion piégé d' $\text{Yb}^+$ ,
  - 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 tétraoxyde d'osmium à 10  $\mu\text{m}$ ,
  - 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.

## ■ Équivalent de dose (PV, 70, 102)

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

### 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 :

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)

**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  $\mu\text{m}$  ;
- des valeurs mises à jour de la fréquence d'étalons asservis sur l'iode à 543 nm et à 515 nm.

22<sup>e</sup> CGPM, 2003

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

**Résolution 10**

La 22<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> Conférence générale de 1948.

## CIPM, 2005

■ **Clarification de la définition du kelvin, unité de température thermo-dynamique** (PV, 73, 119 et *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)\*

\*Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p.92).

### 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  $^2\text{H}$  par mole de  $^1\text{H}$ ,  
0,000 379 9 mole de  $^{17}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$ , et  
0,002 005 2 mole de  $^{18}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$ ,

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  $^2\text{H}$  par mole de  $^1\text{H}$ , 0,000 379 9 mole de  $^{17}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$  et 0,002 005 2 mole de  $^{18}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$  ».

■ **Révision de la liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre** (PV, 73, 120 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  $\mu\text{m}$  ;
- 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  $^{87}\text{Sr}$  à 698 nm ;
- les fréquences des transitions de l'atome de  $^{87}\text{Rb}$  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  $\mu\text{m}$ .

## CIPM, 2006

■ **Au sujet des représentations secondaires de la seconde** (PV, 74, 123 et *Metrologia*, 2007, 44, 97)

## Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

## considérant

- qu'une liste commune de « valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » est à établir,
- que le Groupe de travail commun au Comité consultatif des longueurs (CCL) et au CCTF sur la mise en pratique de la définition du mètre et sur les représentations secondaires de la seconde, lors de sa réunion au Bureau international des poids et mesures (BIPM) en septembre 2005, a discuté des fréquences des radiations candidates potentielles en vue de leur inclusion dans la liste des représentations secondaires de la seconde,
- que le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF a examiné et mis à jour les valeurs des fréquences des transitions de l'ion de mercure (Hg), de l'ion de strontium (Sr), de l'ion d'ytterbium (Yb) et de l'atome neutre de strontium lors de sa session de septembre 2006,
- que le CCTF avait déjà recommandé dans sa Recommandation CCTF 1 (2004) la fréquence de la transition quantique hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de  $^{87}\text{Rb}$  comme représentation secondaire de la seconde,

**recommande** que les fréquences des transitions suivantes soient utilisées comme représentations secondaires de la seconde et soient intégrées à la nouvelle liste des « valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde »

- la transition quantique hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de  $^{87}\text{Rb}$ , à la fréquence de  $\nu_{\text{Rb}} = 6\,834\,682\,610,904\,324\text{ Hz}$ , avec une incertitude-type relative estimée de  $3 \times 10^{-15}$ ,
- la transition optique non perturbée  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{88}\text{Sr}^+$ , à la fréquence de  $\nu_{\text{Sr}^+} = 444\,779\,044\,095\,484\text{ Hz}$ , avec une incertitude-type relative estimée de  $7 \times 10^{-15}$ ,
- la transition optique non perturbée  $5d^{10}\ 6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2D_{5/2} (F=2)$  de l'ion de  $^{199}\text{Hg}^+$ , à la fréquence de  $\nu_{\text{Hg}^+} = 1\,064\,721\,609\,899\,145\text{ Hz}$ , avec une incertitude-type relative estimée de  $3 \times 10^{-15}$ ,
- la transition optique non perturbée  $6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2)$  de l'ion de  $^{171}\text{Yb}^+$ , à la fréquence de  $\nu_{\text{Yb}^+} = 688\,358\,979\,309\,308\text{ Hz}$ , avec une incertitude-type relative estimée de  $9 \times 10^{-15}$ ,
- la transition optique non perturbée  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{87}\text{Sr}$ , à la fréquence de  $\nu_{\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,877\text{ Hz}$ , avec une incertitude-type relative estimée de  $1,5 \times 10^{-14}$ .



**CIPM, 2007****■ Révision de la liste des radiations recommandées pour la mise en pratique de la définition du mètre (PV, 75, 85)****Recommandation 1**

Le Comité international des poids et mesures,

**considérant** que

- l'on a déterminé des valeurs plus précises des fréquences de molécules dans le domaine des télécommunications optiques, valeurs déjà publiées dans la liste des fréquences étalons, à l'aide de peignes à impulsions femtosecondes ;
- l'on a déterminé, pour la première fois, les fréquences de molécules dans le domaine des télécommunications optiques, à l'aide de peignes à impulsions femtosecondes ;
- l'on a déterminé, pour la première fois, les fréquences de certaines transitions dans l'iode, en cellule, transitions proches de la radiation émise par l'étalon de fréquence optique à 532 nm, à l'aide de peignes à impulsions femtosecondes ;

**propose** que la liste des fréquences étalons soit révisée pour y inclure :

- les valeurs mises à jour des fréquences de la bande ( $\nu_1 + \nu_3$ ) de  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ , autour de 1,54  $\mu\text{m}$  ;
- les valeurs des fréquences de la bande ( $2\nu_1$ ) de  $^{12}\text{C}_2\text{HD}$ , autour de 1,54  $\mu\text{m}$  ;
- les valeurs des fréquences des composantes hyperfines des transitions P(142) 37-0, R(121) 35-0 et R(85) 33-0 dans l'iode à 532 nm.

**23<sup>e</sup> CGPM, 2007****■ Sur la révision de la mise en pratique de la définition du mètre et sur la mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence (CR, 171)****Résolution 9**

La 23<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

**considérant**

- les progrès rapides et les améliorations importantes des performances des étalons optiques de fréquence,
- que les techniques des peignes à impulsions femtosecondes sont maintenant couramment utilisées pour relier les radiations optiques et micro-ondes dans un même lieu,
- que les laboratoires nationaux de métrologie travaillent à des techniques de comparaison d'étalons optiques de fréquence sur de courtes distances,
- que des techniques de comparaison à distance doivent être élaborées au niveau international afin de pouvoir comparer les étalons optiques de fréquence,

**accueille favorablement**

- les activités du Groupe de travail commun au Comité consultatif des longueurs et au Comité consultatif du temps et des fréquences pour examiner les fréquences des représentations de la seconde fondées sur des fréquences optiques,
- les ajouts à la mise en pratique de la définition du mètre des radiations recommandées approuvées par le Comité international des poids et mesures en 2002, 2003, 2005, 2006 et 2007,
- l'initiative prise par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) de s'interroger sur le moyen de comparer les étalons optiques de fréquence,

recommande que

- les laboratoires nationaux de métrologie engagent les ressources nécessaires à la mise au point d'étalons optiques de fréquence et à leur comparaison,
- le BIPM œuvre à la coordination d'un projet international auquel participeraient les laboratoires nationaux de métrologie, projet orienté vers l'étude des techniques qui pourraient servir à comparer les étalons optiques de fréquence.

## ■ Sur la clarification de la définition du kelvin, unité de température thermodynamique (CR, 172)

### Résolution 10

La 23<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

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,

**prend acte de, et accueille favorablement,** la décision du Comité international en octobre 2005, sur l'avis du Comité consultatif de thermométrie, selon laquelle

- la définition du kelvin se réfère à une eau de composition isotopique spécifiée
- cette composition isotopique de l'eau est la suivante :

0,000 155 76 mole de  $^2\text{H}$  par mole de  $^1\text{H}$ ,  
0,000 379 9 mole de  $^{17}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$ , et  
0,002 005 2 mole de  $^{18}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$ ,

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 »,

- cette composition est définie dans une note attachée à la définition du kelvin dans la Brochure sur le Système international d'unités 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  $^2\text{H}$  par mole de  $^1\text{H}$ , 0,000 379 9 mole de  $^{17}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$  et 0,002 005 2 mole de  $^{18}\text{O}$  par mole de  $^{16}\text{O}$  ».

Le kelvin a été redéfini par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion en 2018 (Résolution 1, voir p. 92).

## ■ Sur l'éventuelle redéfinition de certaines unités de base du Système international d'unités (SI) (CR, 174)

### Résolution 12

La 23<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures,

considérant

- que les laboratoires nationaux de métrologie et le Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont consacré des efforts considérables depuis de nombreuses années en vue de promouvoir et d'améliorer le Système international d'unités (SI), en repoussant les limites de la métrologie, afin de définir les unités de base du SI en fonction de constantes de la nature – les constantes physiques fondamentales,
- que parmi les sept unités de base du SI, seul le kilogramme est encore défini à partir d'un objet matériel (artefact), à savoir le prototype international du kilogramme (2<sup>e</sup> CGPM, 1889 et 3<sup>e</sup> CGPM, 1901), et que les définitions de l'ampère, de la mole et de la candela dépendent du kilogramme,

La CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) a approuvé la révision du SI (Résolution 1, voir p. 92).

- la 21<sup>e</sup> Conférence générale a adopté en 1999 la Résolution 7, laquelle recommandait 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 »,
- de nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années pour relier la masse du prototype international à la constante de Planck,  $h$ , ou à la constante d'Avogadro,  $N_A$ ,
- les initiatives prises pour déterminer la valeur d'un certain nombre de constantes fondamentales, y compris celle de la constante de Boltzmann  $k_B$ ,
- que des implications significatives et des avantages potentiels découlent de nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole, suite aux progrès récents accomplis,
- la Recommandation 1 (CI-2005) du Comité international adoptée lors de sa session d'octobre 2005 et diverses recommandations des Comités consultatifs sur la redéfinition d'une ou plusieurs unités de base du SI,

**notant**

- que les changements dans les définitions des unités du SI doivent être cohérents,
- que les définitions des unités de base du SI doivent être faciles à comprendre,
- le travail effectué par le Comité international et par ses Comités consultatifs,
- la nécessité de contrôler les résultats des expériences,
- l'importance de solliciter les commentaires et les contributions de la vaste communauté des scientifiques et des utilisateurs,
- la décision du Comité international en 2005 d'approuver, en principe, la préparation de nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et la possibilité de redéfinir la mole,

**recommande** que les laboratoires nationaux de métrologie et le BIPM

- poursuivent les expériences appropriées afin que le Comité international puisse juger s'il est possible ou non de redéfinir le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole en utilisant des valeurs fixées pour certaines constantes fondamentales lors de la 24<sup>e</sup> Conférence générale en 2011,
- réfléchissent, en collaboration avec le Comité international, ses Comités consultatifs et les groupes de travail concernés, aux moyens pratiques de réaliser les nouvelles définitions fondées sur des valeurs fixées de constantes fondamentales, préparent une mise en pratique de chacune d'elles, et examinent quel est le moyen le plus approprié pour expliquer les nouvelles définitions aux utilisateurs,
- suscitent des campagnes de sensibilisation pour alerter les communautés d'utilisateurs sur l'éventualité de nouvelles définitions afin que leurs implications techniques et juridiques, ainsi que leurs réalisations pratiques, soient discutées et examinées avec soin,

**et demande** au Comité international de présenter un rapport à ce sujet à la 24<sup>e</sup> Conférence générale en 2011 et d'entreprendre tous les préparatifs qu'il considère comme nécessaires de manière à ce que, si les résultats des expériences sont jugés convenables et les besoins des utilisateurs satisfaits, il puisse être officiellement proposé à la 24<sup>e</sup> Conférence générale d'approuver de nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole.

**CIPM, 2009****■ Mises à jour de la liste des fréquences étalons (PV, 77, 105)****Recommandation 2**

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

**considérant**

- qu'une liste commune des « valeurs recommandées de fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » a été établie ;
- que le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a examiné plusieurs fréquences candidates en vue de leur inclusion dans cette liste ;

**recommande**

que les fréquences de transition suivantes soient incluses ou mises à jour dans la liste des fréquences étalons recommandées :

- la transition optique non perturbée  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{87}\text{Sr}$ , à la fréquence de  $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873,7$  Hz, avec une incertitude-type relative de  $1 \times 10^{-15}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;
- la transition optique non perturbée  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{88}\text{Sr}$ , à la fréquence de  $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012$  Hz, avec une incertitude-type relative de  $1 \times 10^{-14}$  ;
- la transition optique non perturbée  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{40}\text{Ca}^+$ , à la fréquence de  $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393$  Hz, avec une incertitude-type relative de  $4 \times 10^{-14}$  ;
- la transition optique non perturbée  $^2S_{1/2} (F = 0) - ^2F_{7/2} (F = 3, m_F = 0)$  de l'ion de  $^{171}\text{Yb}^+$ , à la fréquence de  $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657$  Hz, avec une incertitude-type relative de  $6 \times 10^{-14}$  ;
- la transition optique non perturbée  $6s^2\ ^1S_0 (F = 1/2) - 6s\ 6p\ ^3P_0 (F = 1/2)$  de l'atome neutre de  $^{171}\text{Yb}$  à la fréquence de  $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864$  Hz, avec une incertitude-type relative de  $1,6 \times 10^{-13}$ .

**24<sup>e</sup> CGPM, 2011****■ Sur l'éventuelle révision à venir du Système international d'unités, le SI (CR, 212)****Résolution 1**

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 24<sup>e</sup> réunion,

**considérant**

- qu'il existe un consensus international sur l'importance, la valeur et les bénéfices potentiels de la redéfinition d'un certain nombre d'unités du Système international d'unités (SI),
- que les laboratoires nationaux de métrologie et le Bureau international des poids et mesures (BIPM) ont, à juste titre, déployé des efforts considérables au cours de ces dernières décennies afin de faire progresser le Système international d'unités (SI), en repoussant les limites de la métrologie, de façon à ce que les unités de base du SI puissent être définies en s'appuyant sur les constantes de la nature – les constantes physiques fondamentales ou les propriétés des atomes,
- qu'un exemple marquant du succès de ces efforts est la définition actuelle de l'unité de longueur du SI, le mètre (17<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1983, Résolution 1), qui relie l'unité à une valeur exacte de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$ , à savoir 299 792 458 mètres par seconde,

La CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) a approuvé la révision du SI (Résolution 1, voir p. 92).

- que parmi les sept unités de base du SI, seul le kilogramme est encore défini à partir d'un objet matériel (artefact), à savoir le prototype international du kilogramme (1<sup>re</sup> réunion de la CGPM, 1889 ; 3<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1901), et que les définitions de l'ampère, de la mole et de la candela dépendent du kilogramme,
- que, bien que le prototype international ait rendu des services à la science et la technologie depuis qu'il a été sanctionné par la CGPM lors de sa 1<sup>re</sup> réunion en 1889, son utilisation présente des limites importantes, l'une des plus significatives étant que sa masse n'est pas explicitement reliée à une constante de la nature et que, par conséquent, sa stabilité à long terme ne peut être garantie,
- que la CGPM, lors de sa 21<sup>e</sup> réunion en 1999, a adopté la Résolution 7, laquelle 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 »,
- que de nombreux progrès ont été effectués ces dernières années pour relier la masse du prototype international à la constante de Planck  $h$ , par des méthodes telles que les expériences de la balance du watt ou les mesures de la masse d'un atome de silicium,
- que les incertitudes associées à l'ensemble des unités électriques du SI réalisées, directement ou indirectement, au moyen de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique et à partir des valeurs dans le SI des constantes de Josephson et de von Klitzing,  $K_J$  et  $R_K$ , pourraient être réduites de manière significative si le kilogramme était redéfini de façon à ce qu'il soit relié à une valeur numérique exacte de  $h$ , et si l'ampère était redéfini de façon à ce qu'il soit relié à une valeur numérique exacte de la charge élémentaire  $e$ ,
- que la définition actuelle du kelvin se fonde sur une propriété intrinsèque de l'eau qui, bien qu'étant une constante de la nature, dépend dans la pratique de la pureté et de la composition isotopique de l'eau utilisée,
- qu'il est possible de redéfinir le kelvin de façon à le relier à une valeur numérique exacte de la constante de Boltzmann  $k$ ,
- qu'il est également possible de redéfinir la mole de façon à la relier à une valeur numérique exacte de la constante d'Avogadro  $N_A$ , de sorte qu'elle ne dépende plus de la définition du kilogramme, même lorsque le kilogramme sera défini de façon à le relier à une valeur numérique exacte de  $h$ , ce qui mettrait en évidence la distinction entre les grandeurs quantité de matière et masse,
- que les incertitudes liées aux valeurs d'autres constantes fondamentales et facteurs de conversion d'énergie importants seraient éliminées ou réduites de façon considérable si  $h$ ,  $e$ ,  $k$  et  $N_A$  avaient des valeurs numériques exactes lorsqu'elles sont exprimées en unités du SI,
- que la CGPM, lors de sa 23<sup>e</sup> réunion en 2007, a adopté la Résolution 12 qui expose le travail à accomplir par les laboratoires nationaux de métrologie, le BIPM et le Comité international des poids et mesures (CIPM), ainsi que ses Comités consultatifs, afin que les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole fondées sur des constantes fondamentales puissent être adoptées,
- que, bien que des progrès notables aient été réalisés, tous les objectifs fixés par la Résolution 12 adoptée par la CGPM à sa 23<sup>e</sup> réunion n'ont pas été atteints, ce qui ne permet pas au CIPM de soumettre une proposition finalisée,
- qu'il est néanmoins désormais possible de présenter une version claire et détaillée de ce qui sera sans doute proposé,

**prend acte** de l'intention du Comité international des poids et mesures de proposer une révision du SI qui se présenterait de la manière suivante :

- le Système international d'unités, le SI, sera le système d'unités selon lequel :
  - la fréquence de la transition hyperfine dans l'état fondamental de l'atome de césium  $133 \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  est égale à exactement 9 192 631 770 hertz,
  - la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  est égale à exactement 299 792 458 mètres par seconde,

- la constante de Planck  $h$  est égale à exactement  $6,626\,06X \times 10^{-34}$  joule seconde\*,
- la charge élémentaire  $e$  est égale à exactement  $1,602\,17X \times 10^{-19}$  coulomb,
- la constante de Boltzmann  $k$  est égale à exactement  $1,380\,6X \times 10^{-23}$  joule par kelvin,
- la constante d'Avogadro  $N_A$  est égale à exactement  $6,022\,14X \times 10^{23}$  par mole,
- l'efficacité lumineuse  $K_{cd}$  d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz est égale à exactement 683 lumens par watt,

\* Le symbole X apparaissant dans l'expression des constantes indique que le chiffre correspondant n'était pas connu au moment de l'adoption de la Résolution.

où

(i) les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm, et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol, et cd, selon les relations  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{s A}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , et  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ ,

(ii) le symbole X dans le présent projet de résolution correspond à un ou plusieurs chiffres qui devront être ajoutés aux valeurs numériques de  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , et  $N_A$  selon les valeurs résultant de l'ajustement le plus récent fourni par la CODATA,

ce qui signifie que le SI continuera à être établi sur les sept unités de base actuelles et que notamment

- le kilogramme restera l'unité de masse mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Planck à exactement  $6,626\,06X \times 10^{-34}$  lorsqu'elle sera exprimée en  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ , unité du SI égale au joule seconde, J s,
- l'ampère restera l'unité de courant électrique mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire à exactement  $1,602\,17X \times 10^{-19}$  lorsqu'elle sera exprimée en s A, unité du SI égale au coulomb, C,
- le kelvin restera l'unité de température thermodynamique mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann à exactement  $1,380\,6X \times 10^{-23}$  lorsqu'elle sera exprimée en  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , unité du SI égale au joule par kelvin J K<sup>-1</sup>,
- la mole restera l'unité de quantité de matière d'une entité élémentaire spécifique, c'est-à-dire un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupe particulier de telles particules, mais son amplitude sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante d'Avogadro à exactement  $6,022\,14X \times 10^{23}$  lorsqu'elle sera exprimée en unité du SI mol<sup>-1</sup>.

La Conférence générale des poids et mesures,

#### note également

- que les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole seront rédigées en utilisant une formulation dite « à constante explicite », c'est-à-dire une définition dans laquelle l'unité est définie indirectement en donnant explicitement une valeur exacte à une constante fondamentale reconnue,
- que la définition actuelle du mètre est reliée à une valeur exacte de la vitesse de la lumière dans le vide, qui est également une constante fondamentale reconnue,
- que la définition actuelle de la seconde est reliée à une valeur exacte caractérisant une propriété bien définie de l'atome de césium, qui constitue également une constante de la nature,
- que la définition existante de la candela n'est pas liée à une constante fondamentale mais qu'elle peut être considérée comme étant reliée à une valeur exacte d'une constante de la nature,

- que l'intelligibilité du Système international d'unités serait renforcée si toutes ses unités de base étaient définies en utilisant la même formulation,

c'est pourquoi le Comité international des poids et mesures proposera également

de reformuler les définitions actuelles de la seconde, du mètre et de la candela selon une forme complètement équivalente qui pourrait être la suivante :

- la seconde, symbole s, est l'unité de temps ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos, à une température de 0 K, à exactement 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en  $s^{-1}$ , unité du SI égale au hertz, Hz,
- le mètre, symbole m, est l'unité de longueur ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de la vitesse de la lumière dans le vide à exactement 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en unité du SI  $m s^{-1}$ ,
- la candela, symbole cd, est l'unité d'intensité lumineuse dans une direction donnée ; son amplitude est déterminée en fixant la valeur numérique de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique d'une fréquence de  $540 \times 10^{12}$  Hz à exactement 683 lorsqu'elle est exprimée en  $m^{-2} kg^{-1} s^3 cd sr$  ou en  $cd sr W^{-1}$ , unité du SI égale au lumen par watt,  $lm W^{-1}$ .

Il sera ainsi manifeste que les définitions des sept unités de base du SI découlent naturellement des sept constantes précédemment indiquées.

En conséquence, à la date choisie pour mettre en œuvre la révision du SI

- la définition du kilogramme en vigueur depuis 1889, établie à partir de la masse du prototype international du kilogramme (1<sup>re</sup> réunion de la CGPM, 1889 ; 3<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1901), sera abrogée,
- la définition de l'ampère en vigueur depuis 1948 (9<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1948), établie à partir de la définition proposée par le Comité international des poids et mesures (CIPM, 1946, Résolution 2), sera abrogée,
- les valeurs conventionnelles de la constante de Josephson  $K_{J-90}$  et de la constante de von Klitzing  $R_{K-90}$  adoptées par le Comité international des poids et mesures (CIPM, 1988, Recommandations 1 et 2) à la demande de la CGPM (18<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1987, Résolution 6) pour l'établissement des représentations du volt et de l'ohm à l'aide des effets Josephson et Hall quantique, respectivement, seront abrogées,
- la définition du kelvin en vigueur depuis 1967/68 (13<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1967/68), établie à partir d'une définition antérieure moins explicite (10<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1954, Résolution 3), sera abrogée,
- la définition de la mole en vigueur depuis 1971 (14<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1971, Résolution 3), selon laquelle la masse molaire du carbone 12 a la valeur exacte de  $0,012 kg mol^{-1}$ , sera abrogée,
- les définitions existantes du mètre, de la seconde et de la candela, en vigueur depuis leur adoption par la CGPM lors de ses 17<sup>e</sup> (1983, Résolution 1), 13<sup>e</sup> (1967/68, Résolution 1) et 16<sup>e</sup> (1979, Résolution 3) réunions respectivement, seront abrogées.

La Conférence générale des poids et mesures,

**prend en considération** qu'à la même date

- la masse du prototype international du kilogramme  $m(\mathcal{K})$  sera égale à 1 kg, avec cependant une incertitude relative égale à celle de la valeur recommandée de  $h$  juste avant la redéfinition, puis sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la constante magnétique (la perméabilité du vide)  $\mu_0$  sera égale à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ , avec cependant une incertitude relative égale à celle de la valeur recommandée de la constante de structure fine  $\alpha$ , puis sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la température thermodynamique du point triple de l'eau  $T_{\text{TPW}}$  sera égale à 273,16 K, avec cependant une incertitude relative égale à celle de la valeur recommandée de  $k$  juste avant la redéfinition, puis sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la masse molaire du carbone 12  $M(^{12}\text{C})$  sera égale à  $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$ , avec cependant une incertitude relative égale à celle de la valeur recommandée de  $N_A h$  juste avant la redéfinition, puis sa valeur sera déterminée de façon expérimentale.

La Conférence générale des poids et mesures,

**encourage**

- les chercheurs des laboratoires nationaux de métrologie, le BIPM et les institutions universitaires à poursuivre leurs efforts et à transmettre à la communauté scientifique en général et à la CODATA en particulier les résultats de leurs travaux sur la détermination des constantes de  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , et  $N_A$ , et
- le BIPM à poursuivre son travail afin d'assurer la traçabilité au prototype international du kilogramme des prototypes de masse qu'il maintient, ainsi qu'à mettre au point un ensemble d'étalons de référence qui permettra de faciliter la dissémination de l'unité de masse une fois le kilogramme redéfini.,

**et invite**

- la CODATA à continuer à fournir des valeurs pour les constantes fondamentales de la physique ajustées à partir de toutes les données pertinentes disponibles, ainsi qu'à transmettre les résultats au CIPM par l'intermédiaire du Comité consultatif des unités, puisque ce sont les valeurs et incertitudes de la CODATA qui seront utilisées pour la révision du SI,
- le CIPM à lui proposer de réviser le SI dès que les recommandations de la Résolution 12 adoptée par la CGPM à sa 23<sup>e</sup> réunion seront satisfaites, en particulier la préparation des mises en pratique des nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole,
- le CIPM à poursuivre son travail afin d'obtenir une meilleure formulation des définitions des unités de base du SI fondées sur des constantes fondamentales, l'objectif étant de parvenir, autant que possible, à une description plus facilement compréhensible pour l'ensemble des utilisateurs tout en gardant rigueur et clarté scientifiques,
- le CIPM, les Comités consultatifs, le BIPM, l'OIML et les laboratoires nationaux de métrologie à intensifier leurs efforts afin de mettre en place des campagnes de sensibilisation pour informer les communautés d'utilisateurs et le grand public du projet de redéfinition de certaines unités du SI, et à encourager l'examen des implications juridiques, techniques et pratiques de ces redéfinitions, afin de solliciter les commentaires et les contributions de la vaste communauté des scientifiques et des utilisateurs.



## ■ Sur la révision de la mise en pratique de la définition du mètre et sur la mise au point de nouveaux étalons optiques de fréquence (CR, 227)

### Résolution 8

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 24<sup>e</sup> réunion,

#### considérant

- que les performances des étalons optiques de fréquence s'améliorent rapidement et de manière très significative,
- que les laboratoires nationaux de métrologie mettent actuellement en œuvre des techniques de comparaison à courte distance d'étalons optiques de fréquence,
- que des techniques de comparaison à distance d'étalons optiques de fréquence doivent être mises au point au niveau international,

#### accueille favorablement

- les activités du Groupe de travail commun au Comité consultatif des longueurs (CCL) et au Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF) visant à examiner les fréquences des représentations optiques de la seconde,
- les éléments ajoutés par le CIPM en 2009 à la liste commune des « valeurs recommandées de fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde »,
- l'établissement d'un groupe de travail du CCTF sur la coordination de la mise au point de techniques avancées de comparaison de temps et de fréquences,

#### recommande que

- les laboratoires nationaux de métrologie engagent les ressources nécessaires à la mise au point d'étalons optiques de fréquence et à leur comparaison,
- le BIPM aide à la coordination d'un projet international auquel participeraient les laboratoires nationaux de métrologie, portant sur l'étude des techniques qui pourraient être utilisées pour comparer les étalons optiques de fréquence.

## CIPM, 2013

## ■ Mises à jour de la liste des fréquences étalons (PV, 81, 53)

### Recommandation 1

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

#### considérant

- qu'une liste commune des « valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » a été établie,
- que le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a examiné plusieurs fréquences candidates en vue de leur inclusion dans cette liste,

**recommande** d'apporter les changements suivant à la liste commune des « valeurs recommandées des fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » :

- inclure la fréquence de la transition suivante dans la liste des fréquences étalons recommandées :
  - la transition optique non perturbée  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{199}\text{Hg}$ , à la fréquence de 1 128 575 290 808 162 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,7 \times 10^{-14}$  ;
- mettre à jour les fréquences des transitions suivantes dans la liste des fréquences étalons recommandées :
  - la transition optique non perturbée  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{40}\text{Ca}^+$ , à la fréquence de 411 042 129 776 395 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,5 \times 10^{-14}$  ;

- la transition optique non perturbée  $1S - 2S$  de l'atome neutre de  $^1H$ , à la fréquence de 1 233 030 706 593 518 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,2 \times 10^{-14}$  ;

Remarque : cette fréquence correspond à la moitié de l'écart en énergie entre les états  $1S$  et  $2S$  ;

- mettre à jour les fréquences des transitions suivantes dans la liste des fréquences étalons recommandées et les approuver comme représentations secondaires de la seconde :
  - la transition optique non perturbée  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}6s\ ^2F_{7/2}$  de l'ion de  $^{171}Yb^+$  (octupôle), à la fréquence de 642 121 496 772 645,6 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,3 \times 10^{-15}$  ;
  - la transition optique non perturbée  $6s\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{171}Yb$ , à la fréquence de 518 295 836 590 865,0 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $2,7 \times 10^{-15}$  ;
- inclure la fréquence de la transition suivante dans la liste des fréquences étalons recommandées et l'approuver comme représentation secondaire de la seconde :
  - la transition optique non perturbée  $3s\ ^2S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$  de l'ion de  $^{27}Al^+$ , à la fréquence de 1 121 015 393 207 857,3 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,9 \times 10^{-15}$  ;
- mettre à jour les fréquences des transitions suivantes dans la liste des fréquences étalons recommandées et les approuver comme représentations secondaires de la seconde :
  - la transition optique non perturbée  $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s\ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{199}Hg^+$ , à la fréquence de 1 064 721 609 899 145,3 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,9 \times 10^{-15}$  ;
  - la transition optique non perturbée  $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$  de l'ion de  $^{171}Yb^+$  (quadrupôle), à la fréquence de 688 358 979 309 307,1 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $3 \times 10^{-15}$  ;
  - la transition optique non perturbée  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{88}Sr^+$ , à la fréquence de 444 779 044 095 485,3 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $4,0 \times 10^{-15}$  ;
  - la transition optique non perturbée  $5s\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{87}Sr$ , à la fréquence de 429 228 004 229 873,4 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1 \times 10^{-15}$  ;
- mettre à jour la fréquence de la transition suivante dans la liste des fréquences étalons recommandées et l'approuver comme représentation secondaire de la seconde :
  - la transition quantique hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de  $^{87}Rb$ , à la fréquence de 6 834 682 610,904 312 Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,3 \times 10^{-15}$ .

Remarque : La valeur de l'incertitude-type est supposée correspondre à un niveau de confiance de 68 %. Toutefois, étant donné le nombre très limité de résultats disponibles, il se peut que, rétrospectivement, cela ne s'avère pas exact.

25<sup>e</sup> CGPM, 2014

■ **Sur la révision à venir du Système international d'unités, le SI** (CR, 177 et *Metrologia*, 2015, 52, 155)

La CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) a approuvé la révision du SI (Résolution 1, voir p. 92).

**Résolution 1**

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 25<sup>e</sup> réunion,

**rappelant**

- la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011) qui prend acte de l'intention du Comité international des poids et mesures (CIPM) de proposer une révision du SI consistant à relier les définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole à des valeurs numériques exactes de la constante de Planck  $h$ , de la charge élémentaire  $e$ , de la constante de Boltzmann  $k$ , et de la constante d'Avogadro  $N_A$ , respectivement, et à modifier la façon de définir le SI, ainsi que la formulation des définitions des unités du SI pour les grandeurs temps, longueur, masse, courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse, de manière à ce que les constantes de référence sur lesquelles se fonde le SI apparaissent clairement,
- les nombreux avantages, mentionnés dans la Résolution 1, que présentera cette révision du SI pour la science, la technologie, l'industrie et le commerce, tel que le fait de relier le kilogramme à une constante de la nature et non plus à la masse d'un objet matériel (artefact), ce qui assurera sa stabilité à long terme,
- la Résolution 7 adoptée par la CGPM à sa 21<sup>e</sup> réunion (1999) qui encourage les laboratoires nationaux de métrologie à poursuivre les expériences visant à parvenir à une telle redéfinition du kilogramme,
- la Résolution 12 adoptée par la CGPM à sa 23<sup>e</sup> réunion (2007) qui décrit les travaux devant être effectués par les laboratoires nationaux de métrologie, le Bureau international des poids et mesures (BIPM), ainsi que le CIPM et ses Comités consultatifs, afin de permettre l'adoption par la CGPM de la révision du SI,

**considérant** les progrès significatifs réalisés afin d'effectuer les travaux nécessaires, parmi lesquels,

- l'acquisition des données pertinentes, et leur analyse par le Committee on Data for Science and Technology (CODATA), afin d'obtenir les valeurs requises pour les constantes fondamentales de  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , et  $N_A$ ,
- la mise au point par le BIPM d'un ensemble d'étalons de masse de référence qui permettra de faciliter la dissémination de l'unité de masse une fois le SI révisé,
- la préparation des mises en pratique des nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole,

**notant que** le Comité consultatif des unités (CCU), le CIPM, le BIPM, les laboratoires nationaux de métrologie et les Comités consultatifs doivent poursuivre leurs travaux en se concentrant sur

- la mise en place de campagnes de sensibilisation pour informer les communautés d'utilisateurs et le grand public du projet de révision du SI,
- la préparation de la 9<sup>e</sup> édition de la *Brochure sur le SI* dans laquelle le SI révisé serait présenté de façon compréhensible par l'ensemble des lecteurs sans pour autant en compromettre la rigueur scientifique,

**considérant que**, malgré les progrès effectués, les données disponibles ne semblent pas encore suffisamment robustes pour que la CGPM adopte le SI révisé lors de sa 25<sup>e</sup> réunion,

**encourage**

- les laboratoires nationaux de métrologie, le BIPM et les institutions universitaires à poursuivre leurs efforts afin de déterminer expérimentalement les valeurs des constantes de  $h$ ,  $e$ ,  $k$  et  $N_A$  au niveau d'incertitude requis,
- les laboratoires nationaux de métrologie à continuer activement à examiner et discuter de ces résultats au sein des Comités consultatifs,

- le CIPM à continuer à planifier la mise en œuvre de la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), en collaboration étroite avec les Comités consultatifs et le CCU,
- le CIPM et ses Comités consultatifs, les laboratoires nationaux de métrologie, le BIPM, ainsi que d'autres organisations telles que l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML), à poursuivre leurs efforts afin d'effectuer les travaux nécessaires pour que la CGPM adopte, lors de sa 26<sup>e</sup> réunion, une résolution permettant de remplacer le SI actuel par le SI révisé, sous réserve que les données obtenues, tant concernant leur nombre, les incertitudes associées ou leur niveau de cohérence, soient jugées satisfaisantes.

## CIPM, 2015

### ■ Mises à jour de la liste des fréquences étalons (PV, 83, 54)

Des mises à jour sont disponibles sur le site internet du BIPM.

#### Recommandation 2

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

#### considérant

- qu'une liste commune des « valeurs recommandées de fréquences étalons destinées à la mise en pratique de la définition du mètre et aux représentations secondaires de la seconde » a été établie,
- que le Groupe de travail commun au CCL et au CCTF sur les étalons de fréquence a examiné plusieurs fréquences candidates afin de mettre à jour cette liste,

#### recommande

que les fréquences des transitions suivantes soient mises à jour dans la liste des fréquences étalons recommandées :

- la transition optique non perturbée  $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{199}\text{Hg}$ , à la fréquence de  $f_{199\text{Hg}} = 1\,128\,575\,290\,808\,154,8$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $6 \times 10^{-16}$  ;
- la transition optique non perturbée  $6s \ ^2S_{1/2} - 4f^{13} \ 6s^2 \ ^2F_{7/2}$  de l'ion de  $^{171}\text{Yb}^+$ , à la fréquence de  $f_{171\text{Yb}^+}$  (octupôle) =  $642\,121\,496\,772\,645,0$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $6 \times 10^{-16}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;
- la transition optique non perturbée  $6s \ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d \ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$  de l'ion de  $^{171}\text{Yb}^+$ , à la fréquence de  $f_{171\text{Yb}^+}$  (quadripôle) =  $688\,358\,979\,309\,308,3$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $6 \times 10^{-16}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;
- la transition optique non perturbée  $5s \ ^2S_{1/2} - 4d \ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{88}\text{Sr}^+$ , à la fréquence de  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\,779\,044\,095\,486,6$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,6 \times 10^{-15}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;
- la transition optique non perturbée  $4s \ ^2S_{1/2} - 3d \ ^2D_{5/2}$  de l'ion de  $^{40}\text{Ca}^+$ , à la fréquence de  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\,042\,129\,776\,398,4$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $1,2 \times 10^{-14}$  ;
- la transition optique non perturbée  $1S - 2S$  de l'atome neutre de  $^1\text{H}$ , à la fréquence de  $f_{1\text{H}} = 1\,233\,030\,706\,593\,514$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $9 \times 10^{-15}$  ;

Remarque : cette fréquence correspond à la moitié de l'écart en énergie entre les états 1S et 2S ;

- la transition optique non perturbée  $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{87}\text{Sr}$ , à la fréquence de  $f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873,2$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $5 \times 10^{-16}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;
- la transition optique non perturbée  $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$  de l'atome neutre de  $^{171}\text{Yb}$ , à la fréquence de  $f_{171\text{Yb}} = 518\,295\,836\,590\,864,0$  Hz avec une incertitude-type relative estimée de  $2 \times 10^{-15}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;

- la transition hyperfine non perturbée de l'état fondamental de l'atome de  $^{87}\text{Rb}$ , à la fréquence de  $f_{87\text{Rb}} = 6\,834\,682\,610,904\,310\text{ Hz}$  avec une incertitude-type relative estimée de  $7 \times 10^{-16}$  (cette radiation a déjà été approuvée par le CIPM comme représentation secondaire de la seconde) ;

**recommande** par ailleurs

que les fréquences des transitions suivantes soient incluses dans la liste des fréquences étalons recommandées :

- Molécule absorbante de  $^{127}\text{I}_2$ , composante  $a_1$  du spectre d'absorption saturée, transition R(36) 32-0.

Les valeurs  $f_{a1} = 564\,074\,632,42\text{ MHz}$

$\lambda_{a1} = 531\,476\,582,65\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative estimée de  $1 \times 10^{-10}$  s'appliquent à la radiation d'un laser à diode à rétroaction répartie doublé en fréquence, asservi à l'aide d'une cellule d'iode située à l'extérieur du laser.

- Atome absorbant de  $^{87}\text{Rb}$ , transition  $5S_{1/2} - 5P_{3/2}$ , croisement de niveaux entre les composantes hyperfines d et f de l'absorption saturée à 780 nm (transition D2).

Les valeurs  $f_{\text{croisement d/f}} = 384\,227\,981,9\text{ MHz}$

$\lambda_{\text{croisement d/f}} = 780\,246\,291,6\text{ fm}$

avec une incertitude-type relative estimée de  $5 \times 10^{-10}$  s'appliquent à la radiation d'un laser accordable à diode et à cavité externe, asservi sur la résonance de croisement de niveaux d/f dans une cellule de rubidium située à l'extérieur du laser.

Remarque : La valeur de l'incertitude-type est supposée correspondre à un niveau de confiance de 68 %. Toutefois, étant donné le nombre très limité de résultats disponibles, il se peut que, rétrospectivement, cela ne s'avère pas exact.

## CIPM, 2017

### ■ Sur les progrès réalisés en vue d'une éventuelle révision du SI (PV, 85, 28)

#### Décision 10

Le CIPM accueille favorablement les recommandations relatives à la révision du SI formulées par ses Comités consultatifs.

Le CIPM note que les conditions fixées pour procéder à la révision du SI sont désormais remplies et décide de soumettre le Projet de résolution A à la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) à sa 26<sup>e</sup> réunion et de prendre toutes les autres dispositions nécessaires en vue de procéder, tel que cela a été planifié, à la redéfinition du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole.

## 26th CGPM, 2018

■ **Sur la révision du Système international d'unités (SI)** (CR, sous presse et *Metrologia*, 2019, **56**, 022001)

## Résolution 1

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM), à sa 26<sup>e</sup> réunion,

**considérant**

- qu'il est essentiel de disposer d'un Système international d'unités (SI) uniforme et accessible dans le monde entier, pour le commerce international, l'industrie de haute technologie, la santé humaine et la sécurité, la protection de l'environnement, les études sur l'évolution du climat, ainsi que la science fondamentale qui étaye tous ces domaines,
- que les unités du SI doivent être stables sur le long terme, auto cohérentes et réalisables dans la pratique, en étant fondées sur la description théorique actuelle de la nature, au plus haut niveau,
- qu'une révision du SI visant à satisfaire ces exigences a été proposée dans la Résolution 1 adoptée à l'unanimité par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), qui expose en détail une nouvelle façon de définir le SI à partir d'un ensemble de sept constantes, choisies parmi les constantes fondamentales de la physique et d'autres constantes de la nature, à partir desquelles les définitions des sept unités de base sont déduites,
- que les conditions requises par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), confirmées à sa 25<sup>e</sup> réunion (2014), pour procéder à l'adoption d'une telle révision du SI sont désormais remplies,

**décide**

qu'à compter du 20 mai 2019, le Système international d'unités, le SI, est le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé,  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ , est égale à 9 192 631 770 Hz,
- la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , est égale à 299 792 458 m/s,
- la constante de Planck,  $h$ , est égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s,
- la charge élémentaire,  $e$ , est égale à  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C,
- la constante de Boltzmann,  $k$ , est égale à  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  J/K,
- la constante d'Avogadro,  $N_{\text{A}}$ , est égale à  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , est égale à 683 lm/W,

où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol et cd, selon les relations,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , et  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ ,

**prend acte** des conséquences de la révision du SI concernant les unités de base du SI, énoncées dans la Résolution 1 adoptée par la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011), et les confirme dans les annexes de la présente résolution, qui ont même force que la résolution elle-même,

**invite** le Comité international des poids et mesures (CIPM) à publier une nouvelle édition de la *Brochure sur le SI*, « Le Système international d'unités », contenant une description complète du SI révisé.

## Annexe 1. Abrogation des précédentes définitions des unités de base

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la définition de la seconde en vigueur depuis 1967/68 (13<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du mètre en vigueur depuis 1983 (17<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Résolution 1) est abrogée,
- la définition du kilogramme en vigueur depuis 1889 (1<sup>ère</sup> réunion de la CGPM, 1889, 3<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1901), établie à partir de la masse du prototype international du kilogramme, est abrogée,
- la définition de l'ampère en vigueur depuis 1948 (9<sup>e</sup> réunion de la CGPM), établie à partir de la définition proposée par le CIPM (1946, Résolution 2), est abrogée,
- la définition du kelvin en vigueur depuis 1967/68 (13<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Résolution 4) est abrogée,
- la définition de la mole en vigueur depuis 1971 (14<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la définition de la candela en vigueur depuis 1979 (16<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Résolution 3) est abrogée,
- la décision d'adopter les valeurs conventionnelles de la constante de Josephson  $K_{J-90}$  et de la constante de von Klitzing  $R_{K-90}$ , prise par le CIPM (1988, Recommandations 1 et 2) à la demande de la CGPM (18<sup>e</sup> réunion de la CGPM, 1987, Résolution 6) pour l'établissement des représentations du volt et de l'ohm à l'aide des effets Josephson et Hall quantique, respectivement, est abrogée.

## Annexe 2. Statut des constantes utilisées antérieurement dans les anciennes définitions

Il résulte de la nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, et des valeurs recommandées dans l'ajustement spécial de 2017 du Committee on Data for Science and Technology (CODATA), sur lesquelles se fondent les valeurs des constantes choisies pour définir le SI, qu'à compter du 20 mai 2019 :

- la masse du prototype international du kilogramme,  $m(K)$ , est égale à 1 kg avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de  $h$  au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir  $1,0 \times 10^{-8}$  ; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la perméabilité magnétique du vide,  $\mu_0$ , est égale à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de la constante de structure fine  $\alpha$  au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir  $2,3 \times 10^{-10}$  ; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la température thermodynamique du point triple de l'eau,  $T_{TPW}$ , est égale à 273,16 K avec une incertitude-type relative presque égale à celle de la valeur recommandée de  $k$  au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir  $3,7 \times 10^{-7}$  ; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale,
- la masse molaire du carbone 12,  $M(^{12}\text{C})$ , est égale à  $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$  avec une incertitude-type relative égale à celle de la valeur recommandée de  $N_A h$  au moment de l'adoption de la présente résolution, à savoir  $4,5 \times 10^{-10}$  ; dans le futur, sa valeur sera déterminée de façon expérimentale.

### Annexe 3. Les unités de base du SI

La nouvelle définition du SI décrite ci-dessus, fondée sur les valeurs numériques fixées des constantes choisies, permet de déduire la définition de chacune des sept unités de base du SI à l'aide d'une ou plusieurs de ces constantes, selon les cas. Les définitions qui en découlent, qui prendront effet à compter du 20 mai 2019, sont les suivantes :

- La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à  $\text{s}^{-1}$ .
- Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck,  $h$ , égale à  $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$  lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire,  $e$ , égale à  $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$  lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann,  $k$ , égale à  $1,380\,649 \times 10^{-23}$  lorsqu'elle est exprimée en  $\text{J K}^{-1}$ , unité égale à  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $h$ ,  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement  $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$  entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro,  $N_A$ , lorsqu'elle est exprimée en  $\text{mol}^{-1}$ .

La quantité de matière, symbole  $n$ , d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.

- La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en  $\text{lm W}^{-1}$ , unité égale à  $\text{cd sr W}^{-1}$ , ou  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de  $h$ ,  $c$  et  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .



## **Annexe 2. Réalisation pratique des principales unités**

L'annexe 2 est publiée uniquement sous forme électronique sur le site internet du BIPM ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

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

L'annexe 3 est publiée uniquement sous forme électronique sur le site internet du BIPM ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

## **Annexe 4. Notes historiques sur l'évolution du Système international d'unités et ses unités de base**

### **Partie 1. L'évolution historique de la réalisation des unités du SI**

Les méthodes expérimentales utilisées pour réaliser les unités à l'aide d'équations de la physique sont appelées méthodes primaires. Une méthode primaire a pour caractéristique essentielle de permettre de mesurer directement une grandeur dans une unité particulière à partir de sa définition en utilisant seulement des grandeurs et constantes qui n'impliquent pas elles-mêmes l'unité en question.

De façon traditionnelle, une unité pour une grandeur donnée était considérée comme un exemple particulier de cette grandeur, choisie pour fournir des valeurs numériques de mesures courantes d'une taille convenable. Avant l'avènement de la science moderne, les unités étaient nécessairement définies à partir d'artéfacts matériels, notamment le mètre pour la longueur et le kilogramme pour la masse, ou à partir de la propriété d'un objet particulier, comme la rotation de la Terre pour la seconde. Toutefois, même à l'origine du système métrique à la fin du 18<sup>e</sup> siècle, il était reconnu qu'une définition plus souhaitable de l'unité de longueur, par exemple, serait une définition fondée sur une propriété universelle de la nature telle que la longueur d'un pendule battant la seconde. Une telle définition serait indépendante du moment et du lieu de réalisation de l'unité et serait en principe accessible dans le monde entier. À cette époque, des considérations pratiques ont conduit à des définitions plus simples, fondées sur des artéfacts, du mètre et du kilogramme et la seconde est restée liée à la rotation de la Terre. Ce n'est qu'en 1960 que la première définition non matérielle du mètre, à savoir la longueur d'onde d'un rayonnement optique spécifique, a été adoptée.

Les définitions de l'ampère, du kelvin, de la mole et de la candela qui furent ensuite adoptées ne faisaient pas référence à des artéfacts matériels : la définition de l'ampère était fondée sur un courant électrique spécifique requis pour produire une force électromagnétique donnée et la définition du kelvin sur un état thermodynamique particulier du point triple de l'eau. La définition atomique de la seconde reposait sur une transition spécifique de l'atome de césium. Le kilogramme a toujours fait exception puisque c'était la seule unité restant fondée sur un artéfact. La définition qui a ouvert la voie à une réelle universalité a été celle du mètre adoptée en 1983. Bien qu'elle ne l'indique pas explicitement, cette définition impliquait une valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière. La définition était formulée, cependant, de façon traditionnelle et énonçait pour l'essentiel que le mètre était la distance parcourue par la lumière en un temps donné. De cette façon, la définition du mètre avait la même forme que les définitions des autres unités de base du SI (« l'ampère est le courant qui... », « le kelvin est une fraction d'une température précise », etc.). De telles définitions peuvent être désignées sous le terme de « définitions à unité explicite ».

Bien que ces définitions répondent à plusieurs des exigences d'universalité et d'accessibilité, et qu'elles peuvent être réalisées de diverses façons possibles, elles limitent toutefois les réalisations pratiques à des expériences directement ou indirectement liées aux conditions ou états particuliers précisés dans les définitions. Par conséquent, l'exactitude de la mise en pratique de telles définitions ne peut jamais être meilleure que l'exactitude de la réalisation des conditions ou états particuliers précisés dans les définitions.

C'est un problème particulier avec l'actuelle définition de la seconde fondée sur une transition microonde d'un atome de césium. Il a été établi que les fréquences des transitions optiques de différents atomes ou ions sont désormais plus reproductibles, de quelques ordres de grandeur, que la fréquence définie du césium.

Dans la présente révision du SI fondée sur un ensemble de constantes choisies, au lieu que chaque définition indique une condition ou un état spécifique, ce qui impose une limite fondamentale à l'exactitude de la réalisation, toute équation appropriée de la physique qui relie la ou les constantes particulières à la grandeur à mesurer peut être utilisée. Les unités de base sont ainsi définies de façon beaucoup plus générale, sans limite imposée par la science ou les technologies actuelles car les progrès à venir pourront conduire à découvrir des équations aujourd'hui inconnues qui permettront de réaliser les unités de différentes manières, à un niveau d'exactitude beaucoup plus élevé. Avec un système d'unités ainsi défini, il n'existe en principe aucune limite concernant l'incertitude à laquelle une unité peut être réalisée. L'exception reste la définition de la seconde pour laquelle la transition microonde du césium est conservée, pour le moment, comme base de la définition.

La différence entre une « définition à unité explicite » et une « définition à constante explicite » peut être clairement illustrée à l'aide des deux précédentes définitions du mètre qui reposaient sur une valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière ou à l'aide des deux définitions du kelvin. La définition originale du mètre de 1983 indique, en effet, que « le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde ». La nouvelle définition indique simplement que le mètre est défini en fonction de la constante définissant la seconde, la fréquence du césium précisée, et de la valeur numérique de la vitesse de la lumière exprimée en unité  $\text{m s}^{-1}$ . Il est ainsi possible d'utiliser toute équation de la physique, y compris bien sûr celle spécifiée dans la précédente définition, le temps nécessaire pour effectuer le trajet d'une distance donnée, utilisée pour les distances astronomiques, mais aussi la simple équation reliant la fréquence et la longueur d'onde à la vitesse de la lumière. La précédente définition du kelvin fondée sur une valeur numérique fixée de la température du point triple de l'eau nécessite en fin de compte une mesure à la température du point triple de l'eau. La nouvelle définition, fondée sur la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, est beaucoup plus générale au sens où toute équation thermodynamique contenant  $k$  peut en principe être utilisée pour déterminer une température thermodynamique à tout point de l'échelle de température. Par exemple, en déterminant l'exitance énergétique totale d'un corps noir à la température  $T$ , équivalente à  $(2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3) T^4$ , en  $\text{W m}^{-2}$ , il est possible de déterminer directement  $T$ .

Concernant le kilogramme, l'unité dont la définition a changé de la façon la plus fondamentale dans la présente brochure, la réalisation peut être effectuée à partir de toute équation de la physique reliant la masse, la constante de Planck, la vitesse de la lumière et la fréquence du césium. L'une de ces équations est celle décrivant le fonctionnement d'une balance électromécanique, connue précédemment sous le nom de balance du watt et plus récemment de balance de Kibble<sup>1</sup>. Une balance de Kibble permet de mesurer une puissance

<sup>1</sup> La balance du watt a été renommée balance de Kibble, du nom de son inventeur Bryan Kibble.

mécanique, mesurée en fonction d'une masse,  $m$ , l'accélération due à la gravité,  $g$ , et une vitesse,  $v$ , à l'aide d'une puissance électrique mesurée à partir d'un courant électrique et d'une tension mesurées à l'aide des effets Hall quantique et Josephson, respectivement. L'équation qui en résulte est la suivante  $mgv = Ch$  où  $C$  est une constante d'étalonnage qui comprend des fréquences mesurées et  $h$  la constante de Planck.

Une autre méthode pouvant être utilisée comme réalisation primaire du kilogramme est la détermination du nombre d'atomes contenus dans une sphère de silicium à l'aide de l'équation :

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h}{c\alpha^2} \frac{m_{\text{Si}}}{m_e}$$

avec la masse  $m$  et le volume  $V$  de la sphère (d'environ 1 kg), le paramètre de réseau  $a_0$ , la constante de Rydberg  $R_\infty$ , la constante de structure fine  $\alpha$ , la masse d'un atome de silicium (en établissant une moyenne par rapport aux trois isotopes des sphères)  $m_{\text{Si}}$ , et la masse d'un électron  $m_e$ . La première fraction correspond au nombre d'atomes contenus dans la sphère, la deuxième à la masse de l'électron et la troisième au rapport de la masse de l'atome de silicium (pondérée isotopiquement) et de la masse de l'électron.

Une autre possibilité pour mesurer la masse à l'aide de la nouvelle définition du kilogramme, mais cette fois au niveau microscopique, est de mesurer le recul atomique à l'aide de la relation incluant  $h/m$ .

Toutes ces méthodes illustrent parfaitement le caractère général de la nouvelle façon de définir les unités. Le site internet du BIPM contient des informations détaillées sur les réalisations actuelles des unités de base et des autres unités.

## Partie 2. L'évolution historique du Système international

La CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion (1948, Résolution 6 ; CR, 64), chargea le CIPM :

- 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
- d'émettre des recommandations concernant l'établissement d'un [...] *système pratique d'unités de mesure*, susceptible d'être adopté dans tous les pays signataires de la Convention du Mètre.

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

La CGPM à sa 10<sup>e</sup> réunion (1954, Résolution 6 ; CR, 80) adopta comme grandeurs et unités de base de ce système pratique d'unités les six grandeurs suivantes : longueur, masse, temps, courant électrique, température thermodynamique et intensité lumineuse, ainsi que les six unités de base correspondantes : mètre, kilogramme, seconde, ampère, kelvin et candela. Après de longues discussions entre physiciens et chimistes, la CGPM à sa 14<sup>e</sup> réunion (1971, Résolution 3, CR 78 et *Metrologia* 1972, **8**, 36) ajouta la quantité de matière comme septième grandeur de base, avec pour unité de base la mole.

La CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (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 CGPM et le CIPM étoffèrent et modifièrent la structure originelle du SI pour tenir compte des progrès de la science et de l'évolution des besoins des utilisateurs.

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

- 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.
- Le fait de 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 (IEC), 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, le 20 mai 1875, de la Convention du Mètre, qui créa le BIPM et établit la CGPM et le CIPM, on fabriqua de nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme, approuvés en 1889 par la CGPM à sa 1<sup>ère</sup> réunion. 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, connu sous le nom de système MKS.
- En 1901, Giorgi montra qu'il était possible de combiner les unités mécaniques du système MKS 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 CGPM à sa 6<sup>e</sup> réunion (1921), qui étendit les attributions et les responsabilités du BIPM à d'autres domaines de la physique, et la création du Comité consultatif d'électricité (CCE) par la CGPM à sa 7<sup>e</sup> réunion qui en a résulté en 1927, la proposition de Giorgi fut discutée en détail par l'IEC, l'International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) 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 BIPM à partir de 1948, la CGPM à sa 10<sup>e</sup> réunion (1954) approuva l'introduction du kelvin et de la candela comme unités de base de la température thermodynamique et de l'intensité lumineuse, respectivement. La CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (1960) donna le nom de Système international d'unités (SI) à ce système. Des règles pour les préfixes, les unités dérivées et les unités supplémentaires (disparues depuis) et d'autres indications furent établies, établissant ainsi une réglementation d'ensemble pour les unités de mesure.
- Lors de la 14<sup>e</sup> réunion de la CGPM (1971), une nouvelle unité de base, la mole, symbole mol, a été adoptée pour la quantité de matière. Cela fit suite à une proposition formulée par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), émanant en premier lieu de la Commission on Symbols, Units and Nomenclature de l'International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) et soutenue par l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Le SI passa ainsi à sept unités de base.
- Depuis, des avancées extraordinaires ont été réalisées pour relier les unités du SI à des grandeurs véritablement invariantes telles que les constantes fondamentales de la physique et les propriétés des atomes. Reconnaisant l'importance de relier les unités du SI à de telles grandeurs invariantes, la CGPM à sa 24<sup>e</sup> réunion (2011) adopta les principes d'une nouvelle définition du SI fondée sur l'utilisation d'un ensemble de sept constantes de ce type comme références des définitions des unités. Au moment de la 24<sup>e</sup> réunion de la CGPM, les expériences visant à déterminer les valeurs numériques de ces constantes ne permettaient pas d'obtenir des résultats complètement cohérents mais cela fut le cas lors de la 26<sup>e</sup> réunion de la CGPM (2018) et la nouvelle définition du SI fut adoptée dans la Résolution 1. Telle est la base de la définition du SI présentée dans la présente brochure : elle constitue la façon la plus simple et la plus fondamentale de définir le SI.
- Le SI était précédemment défini en fonction de sept unités de base, et d'unités dérivées définies comme le produit de puissances des unités de base. Les sept unités de base avaient été choisies pour des raisons historiques, en fonction de l'évolution du système métrique et du développement du SI au cours des 130 dernières années. Le choix de ces unités n'était pas le seul possible mais au fil des ans, cela est devenu un fait établi et ces unités sont devenues familières, fournissant non seulement un cadre pour décrire le SI mais aussi pour définir les unités dérivées. Le rôle des unités de base demeure le même dans l'actuel SI, bien que le SI lui-même soit défini sur la base de sept constantes choisies. Ainsi, dans la présente brochure, les définitions des sept unités de base restent présentes mais elles se fondent sur les sept constantes définissant le SI, à savoir la fréquence  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium, la vitesse  $c$  de la lumière dans le vide,

la constante de Planck  $h$ , la charge élémentaire  $e$ , la constante de Boltzmann  $k$ , la constante d'Avogadro  $N_A$  et l'efficacité lumineuse  $K_{cd}$  d'un rayonnement visible défini.

Les définitions des sept unités de base peuvent être reliées sans ambiguïté aux valeurs numériques des sept constantes définissant le SI mais il n'existe pas de correspondance biunivoque entre les sept constantes et les sept unités de base car plusieurs des unités de base peuvent être reliées à plus d'une de ces sept constantes.

### Partie 3. Perspective historique sur les unités de base du SI

#### Unité de temps, la seconde

Avant 1960, l'unité de temps, la seconde, était définie 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 du fait des irrégularités de la rotation de la Terre. Pour donner plus de précision à la définition de l'unité de temps, la CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (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 était indispensable pour la science et la technologie, la CGPM à sa 13<sup>e</sup> réunion (1967-1968, Résolution 1 ; CR, 103 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) choisit une nouvelle définition de la seconde fondée sur la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133. Une nouvelle formulation plus précise de cette même définition, fondée désormais sur une valeur numérique fixée de la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé,  $\Delta\nu_{Cs}$ , a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

#### Unité de longueur, le mètre

La définition du mètre de 1889, à savoir la longueur du prototype international en platine iridié, avait été remplacée par la CGPM à sa 11<sup>e</sup> réunion (1960) par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation correspondant à une transition particulière 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. Cette définition fut remplacée en 1983 par la CGPM à sa 17<sup>e</sup> réunion (Résolution 1 ; CR, 97 et *Metrologia*, 1984, **20**, 25) par une définition fondée sur la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière dans un intervalle de temps spécifique. Le prototype international du mètre originel, qui fut approuvé par la CGPM à sa 1<sup>ère</sup> réunion en 1889 (CR, 34-38), est toujours conservé au BIPM dans les conditions fixées en 1889. Afin de mettre en évidence la dépendance de la définition du mètre vis-à-vis de la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière,  $c$ , la formulation de la définition du mètre a été modifiée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.



## Unité de masse, le kilogramme

Selon la définition du kilogramme de 1889, l'unité de masse était simplement égale à la masse du prototype international du kilogramme, un artéfact fabriqué en platine iridié. Ce prototype était conservé au BIPM, et l'est toujours, dans les conditions fixées par la CGPM à sa 1<sup>ère</sup> réunion en 1889 (CR, 34-38) lorsque cette dernière sanctionna le prototype et déclara : « Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse ». Quarante prototypes similaires ont été fabriqués à la même époque ; tous ont été usinés et polis afin d'avoir la même masse que celle du prototype international. Lors de la première réunion de la CGPM en 1889, la plupart de ces « étalons nationaux », une fois étalonnés à l'aide du prototype international du kilogramme, ont été assignés à des États Membres de la Convention du Mètre et certains au BIPM. La CGPM à sa 3<sup>e</sup> réunion en 1901 (CR, 70), dans une déclaration visant à faire cesser l'ambiguïté qui existait dans l'usage courant sur la signification du terme « poids », confirma que « le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme » ; la version complète de cette déclaration figure page 70 des comptes rendus de la CGPM précédemment mentionnés.

Lors de la seconde vérification des prototypes nationaux en 1946, il fut toutefois constaté qu'en moyenne, la masse de ces prototypes divergeait par rapport à celle du prototype international. Cela fut confirmé lors de la troisième vérification, effectuée de 1989 à 1991, la différence moyenne étant d'environ 25 microgrammes pour l'ensemble des prototypes originaux sanctionnés par la CGPM à sa première réunion (1889). Afin d'assurer la stabilité à long terme de l'unité de masse, de tirer pleinement parti des étalons électriques quantiques et de répondre au mieux à la science moderne, une nouvelle définition du kilogramme fondée sur la valeur d'une constante fondamentale, la constante de Planck  $h$ , a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

## Unité de courant électrique, l'ampère

Des unités électriques, dites « internationales », pour le courant et 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.

Le souhait unanime de remplacer ces unités « internationales » par des unités dites « absolues » fut déjà exprimé lors de la 8<sup>e</sup> réunion de la CGPM (1933). Toutefois, étant donné que certains laboratoires n'avaient pas encore achevé les expériences nécessaires pour déterminer les rapports entre les unités internationales et les unités absolues, la CGPM chargea le CIPM de décider, en temps opportun, des rapports et de la date d'adoption de ces nouvelles unités absolues. Le CIPM décida en 1946 (1946, Résolution 2, PV, **20**, 129-137) que les nouvelles unités entreraient en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1948. En octobre 1948, la CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion approuva les décisions prises par le CIPM. La définition de l'ampère choisie par le CIPM était fondée sur la force produite entre deux conducteurs parallèles parcourus par un courant électrique et fixait par conséquent la valeur de la perméabilité magnétique du vide  $\mu_0$  (ou constante magnétique). La valeur de la permittivité diélectrique du vide  $\varepsilon_0$  (ou constante électrique) fut ensuite fixée du fait de l'adoption de la nouvelle définition du mètre en 1983.

Toutefois, la définition de l'ampère de 1948 s'avéra difficile à réaliser et les étalons quantiques pratiques (à effet Josephson et à effet Hall quantique), qui relient le volt et l'ohm aux combinaisons particulières de la constante de Planck  $h$  et de la charge élémentaire  $e$ , furent utilisés de façon presque universelle comme réalisation pratique de

l'ampère à l'aide de la loi d'Ohm (CGPM, 1987, Résolution 6 ; CR, 100). Par conséquent, il devint naturel non seulement de fixer la valeur numérique de  $h$  pour redéfinir le kilogramme mais aussi de fixer la valeur numérique de  $e$  pour redéfinir l'ampère afin que les étalons électriques quantiques pratiques soient exactement en accord avec le SI. L'actuelle définition de l'ampère fondée sur une valeur numérique fixée de la charge élémentaire,  $e$ , a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

### Unité de température thermodynamique, le kelvin

La définition de l'unité de température thermodynamique fut donnée par la CGPM à sa 10<sup>e</sup> réunion (1954, Résolution 3 ; CR, 79) qui choisit le point triple de l'eau,  $T_{\text{TPW}}$ , comme point fixe fondamental en lui attribuant la température de 273,16 K par définition. La CGPM à sa 13<sup>e</sup> réunion (1967-1968, Résolution 3 ; CR, 104 et Metrologia, 1968, 4, 43) adopta le nom « kelvin », symbole K, au lieu de « degré kelvin », symbole °K, pour l'unité définie de cette façon. Toutefois, les difficultés pratiques liées à la réalisation de cette définition, qui requiert un échantillon d'eau pure à la composition isotopique bien définie ainsi que le développement de nouvelles méthodes primaires thermométriques, ont conduit à l'adoption d'une nouvelle définition du kelvin fondée sur une valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann,  $k$ . L'actuelle définition du kelvin, qui supprime ces contraintes, a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

### Unité de quantité de matière, la 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 atomiques et moléculaires relatives. Les « poids atomiques » furent d'abord rapportés à celui de l'élément chimique oxygène, pris par convention égal à 16. 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'International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) et l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) mit fin à cette dualité en 1959/60. Physiciens et chimistes convinrent d'attribuer la valeur 12, exactement, au « poids atomique » de l'isotope 12 du carbone (carbone 12,  $^{12}\text{C}$ ), ou selon une formulation plus correcte à la masse atomique relative  $A_r$  de l'isotope 12 du carbone. 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. Cet accord est resté en vigueur jusqu'à la redéfinition du SI en 2018.

La grandeur utilisée par les chimistes pour spécifier la quantité d'éléments ou de composés chimiques est appelée « quantité de matière ». La quantité de matière, symbole  $n$ , est définie comme étant proportionnelle au nombre d'entités élémentaires  $N$  d'un échantillon, la constante de proportionnalité étant une constante universelle identique pour toutes les entités. La constante de proportionnalité est l'inverse de la constante d'Avogadro,  $N_A$ , de sorte que  $n = N/N_A$ . L'unité de quantité de matière est appelée la *mole*, symbole mol. Suivant les propositions de l'IUPAP, de l'IUPAC et de l'ISO, le CIPM donna une définition de la mole en 1967 qu'il confirma en 1969 : la masse molaire du carbone 12 devait être exactement 0,012 kg/mol. Cela permettait de déterminer directement la quantité

de matière  $n_S(X)$  de tout échantillon pur S d'une entité X à partir de la masse de l'échantillon  $m_S$  et de la masse molaire  $M(X)$  de l'entité X, la masse molaire étant elle-même déterminée à partir de sa masse atomique relative  $A_r$  (poids atomique ou moléculaire) sans avoir besoin de connaître de façon précise la constante d'Avogadro, à l'aide des relations

$$n_S(X) = m_S/M(X), \text{ and } M(X) = A_r(X) \text{ g/mol}$$

Ainsi, la définition de la mole dépendait de la définition du kilogramme fondée sur un artefact.

La valeur numérique de la constante d'Avogadro ainsi définie était égale au nombre d'atomes dans 12 grammes de carbone 12. Toutefois, en raison des avancées technologiques récentes, ce nombre est désormais connu avec une précision telle qu'une définition plus simple et plus universelle de la mole est devenue possible, à savoir une définition indiquant exactement le nombre d'entités dans une mole d'une matière quelle qu'elle soit, ce qui fixe la valeur numérique de la constante d'Avogadro. Par conséquent, cette nouvelle définition de la mole et la valeur de la constante d'Avogadro ne sont plus dépendantes de la définition du kilogramme. Par ailleurs, cela souligne la distinction entre les grandeurs fondamentalement différentes « quantité de matière » et « masse ». L'actuelle définition de la mole fondée sur une valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro,  $N_A$ , a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

### Unité d'intensité lumineuse, la 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 CIPM ; la décision fut prise par le CIPM en 1946. Elle fut ratifiée en 1948 par la CGPM à sa 9<sup>e</sup> réunion qui adopta pour cette unité un nouveau nom international, la *candela*, symbole cd ; en 1954, la CGPM à sa 10<sup>e</sup> réunion établit la candela comme unité de base ; en 1967, la CGPM à sa 13<sup>e</sup> réunion (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<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 3 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56) adopta une nouvelle définition de la candela.

L'actuelle définition de la candela, fondée sur une valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , a été adoptée par la CGPM à sa 26<sup>e</sup> réunion (2018) dans sa Résolution 1.

## Liste des sigles utilisés dans le présent volume

### 1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

BAAS	British Association for the Advancement of Science
BIPM	Bureau international des poids et mesures
CARICOM	Caribbean Community/Communauté des Caraïbes
CCAUV	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 et biologie
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
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
IEC	Commission électrotechnique internationale
IERS	Service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence/International Earth Rotation and Reference Systems Service
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
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, IUPAP
UAI	Union astronomique internationale

## 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
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
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

## A

accélération due à la pesanteur ( $g_n$ ), 33, 48  
 activité d'un radionucléide, 26, 27  
 ampère (A), 13, 16, 18, 20, 28, 44, 49, 51, 52, 54, 55, 71, 81, 83-86, 89, 91-94, 97, 99, 100, 101, 103-104  
 angle, 25, 26, 33, 37 38, 40, 48, 55, 65  
 atmosphère normale, 52  
 atome gramme, 104  
 atome de césium, niveaux hyperfins, 15, 17, 18, 56, 58, 83, 85, 92, 94, 97, 98, 102

## B

balance du watt/de Kibble, 83, 98  
 bar, 51  
 becquerel (Bq), 26, 29, 57, 63  
 bel (B), 33-34  
 bougie nouvelle, 48, 51, 60, 64, 105  
 British Association for the Advancement of Science (BAAS), 100

## C

calorie, 51  
 calcul formel, 36-37  
 candela (cd), 13, 16, 18, 22-23, 29, 48, 51, 52, 54, 59, 63-64, 71, 81, 83-85, 92-94, 97, 99, 102, 105  
 capacité thermique, 28, 36  
 carbone 12, 22, 62, 85-86, 93, 104-105  
 CGS, 50, 100, 55  
 charge électrique, 26, 28  
 chiffres groupés par tranches de 3 chiffres, 38, 51, 76  
 chimie clinique, 22, 71  
 CODATA, 34, 84, 86, 89, 93  
 constante,  
   d'Avogadro, 15, 16, 17, 21-22, 81, 83, 84, 89, 92, 94, 102, 104-105

  de Boltzmann, 15, 16, 17, 20, 81, 83, 84, 89, 92, 94, 98, 102, 104  
   de Josephson ( $K_J$ ,  $K_{J-90}$ ), 68, 83, 85, 93  
   de Planck, 10, 15, 16, 17, 19, 34, 81, 83-84, 89, 92, 94, 98, 99, 102, 103, 105  
   de von Klitzing ( $R_K$ ,  $R_{K-90}$ ), 69, 83 85, 93  
   définissant le SI, 10, 14, 15, 16, 23, 25, 101, 102  
   de structure fine, 17, 86, 93, 99  
   fondamentale (de la physique), 10, 15, 16, 71, 73, 81, 83, 84-85, 86, 89, 92, 101, 103  
   magnétique, perméabilité du vide, 20, 86, 93, 103  
 continuité, 11, 16, 41, 64, 69  
 Convention du Mètre, 5-7, 10, 13, 47, 50, 53, 99-101  
 coulomb (C), 16, 26, 49, 51, 55, 84, 92  
 courant électrique, 18, 20, 24, 28, 49, 52, 54, 84, 89, 94, 97, 99, 100, 103  
 curie (Ci), 57

## D

dalton (Da), 33-34  
 décibel (dB), 33-34  
 définition à constante explicite, 98  
 définition à unité explicite, 97-98  
 degré Celsius (°C), 21, 26-27, 29, 36, 38, 50-51  
 degré kelvin, 52, 54, 58, 104  
 dimension (d'une grandeur), 24, 29  
 dose absorbée, 26, 28-30, 63, 64, 67, 74-75  
 dose, équivalent de, *voir* sievert  
 dyne (dyn), 51, 52

**E**

eau, composition isotopique, 59, 76-77, 80, 83, 104  
 échelle  
   de température thermodynamique, 17, 21, 98,  
   internationale de température de 1990 (EIT-90), 21, 69-70  
 effet  
   Hall (y compris Hall quantique), 67, 68, 69, 83, 85, 93, 99, 103  
   Josephson, 67, 68, 83, 85, 93, 99, 103  
 électronvolt (eV), 33, 34  
 erg, 51

**F**

farad (F), 26, 49, 51  
 fréquence du césium, 17, 18, 94, 98

**G**

gal (Gal), 33  
 Gauss, 100  
 Giorgi, 100, 101  
 gramme, 51, 58, 100  
 grandeurs, 15  
   de base, 17, 18, 24, 28, 99  
   de comptage, 24, 39  
   dérivées, 22, 24, 26, 27, 28  
   logarithmiques, 34  
   photobiologiques, 29, 96  
   photochimiques, 29, 96  
   règles d'écriture, 36-40  
   sans dimension, 65  
   symboles (recommandés), 24, 36-40  
   valeur numérique, 36-39  
 gray (Gy), 26, 29, 63, 67, 75

**H**

hectare (ha), 33  
 henry (H), 20, 26, 49, 51, 55  
 hertz (Hz), 16, 26, 29, 51, 55, 84, 85, 92  
 heure (h), 33, 51

**I**

incertitude, 15, 16, 18-22, 38-39  
 intensité lumineuse, 18, 22, 23, 24, 45, 99, 101, 105

ISO, 35, 101  
   ISO/TC 12, 65  
   série ISO/IEC 80000, 12, 14, 17, 29, 36  
 IUPAC, 36, 101, 104 ; livre vert, 36  
 IUPAP, 101, 104  
 IUPAP SUNAMCO, livre rouge, 36

**J**

joule (J), 16, 17, 26, 29, 49-50, 55, 84, 92  
 jour (d), 33

**K**

katal (kat), 26, 71-72  
 kelvin (K), 13, 16, 17, 18, 20-21, 27, 49, 52, 58-59, 69, 76-77, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 89, 91, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 101, 104  
 kilogramme, 13, 18, 19, 32, 47, 48, 52, 54, 71, 80-81, 83-86, 89, 91, 92-94, 97, 98, 99-101, 103, 104, 105  
   multiples et sous-multiples, 32, 57-58  
   prototype international, 13, 47, 48, 80-81, 83-86, 89, 92-94, 97, 103

**L**

législation sur les unités, 14, 48  
 litre (L ou l), 12, 33, 35, 46  
 longueur, 6, 15, 18, 19, 24, 33, 39, 40, 42, 97, 98, 100, 102  
 lumen (lm), 16, 29, 48, 51, 55, 92 ;  
   nouveau, 48  
 lux (lx), 26, 29, 51, 55

**M**

masse, 18, 19, 24, 33, 37, 43, 97, 98, 99, 100, 103  
 masse et poids, 48  
 masse de l'électron, 99  
 masse molaire, 22, 85, 86, 93, 104, 105  
 Maxwell, 100  
 mésopique, *voir* vision mésopique  
 mètre (m), 13, 14, 16, 18, 19, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 66-67, 72-73, 75, 77, 78, 79, 82, 84, 85, 87, 90, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 100, 101, 102  
   prototype international, 47, 48, 53, 100, 102

minute (min), 33, 38  
 MKS, 49, 50, 100  
 MKSA, 101  
 mole (mol), 16, 17, 18, 21-22, 54, 62, 81, 83, 84, 85, 89, 91, 92, 93, 94, 97, 99, 101, 104-105  
 molécule gramme, 104  
 multiples du kilogramme, 32, 57-58  
 multiples et sous-multiples, préfixes, 25, 27, 31-32, 54, 57, 60, 63, 70, 72

## N

néper (Np), 33-34  
 newton (N), 20, 26, 49, 51, 55  
 nombre d'Avogadro, 21, 94  
 notes historiques, 97-105

## O

ohm ( $\Omega$ ), 26, 49, 51, 55, 61, 67-69, 93, 100, 103-104  
 OIML, 14, 86, 90  
 OMS, 30

## P

pascal (Pa), 26, 61  
 photopique, *voir* vision photopique  
 pied, 34  
 poids (*voir* masse)  
 poids atomique, 104, 105  
 poids moléculaire, 104, 105  
 point triple de l'eau, 13, 21, 49-50, 52, 59, 76, 80, 86, 93, 97, 98, 104  
 poise (P), 51  
  
 pouce, 34  
 ppb, 39  
 ppm, 39  
 ppt, 39  
 préfixes SI, 25, 27, 31-32, 33-34, 35-36, 39, 46, 54, 57, 60, 63, 70, 72, 99, 100, 101

## Q

quantité de matière, 17, 18, 21-22, 24, 39, 45, 99, 101, 104-105  
 quantité de chaleur, *voir* joule

## R

radian (rad), 28-29, 31, 45, 60, 70, 75-76  
 rayonnements ionisants, 16, 29, 30, 63, 64, 67, 74  
 rayonnement monochromatique, 15, 16, 17, 22-23, 64, 84, 85, 94, 105  
 relativité générale, 30, 73

## S

scotopique, *voir* vision scotopique  
 seconde, 10, 18-19, 23, 33, 35, 51, 52-53, 54, 56, 58, 61, 78, 82, 85, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 97, 98, 99, 100, 101, 102  
 seconde d'arc, 33  
 séparateur décimal, 12, 38, 75-76  
 SI, *voir* Système international d'unités  
 siemens (S), 26, 61  
 sievert (Sv), 26-27, 29-30, 64, 67, 74-75  
 stéradian (sr), 23, 25, 26, 27, 40, 48, 55, 65, 70-71  
 stilb (sb), 51  
 symboles  
   écriture et emploi des, 35-40  
   des grandeurs, 18, 24  
   unités, 12, 18, 35  
   unités (obligatoires), 18, 36  
   unités dérivées ayant des noms spéciaux, 26-29  
 système  
   international d'unités (SI), 10-11, 13-14, 15-17, 42 ; création, 42, 97-105  
   métrique décimal, 100

## T

TAI, *voir* Temps atomique international  
 température  
   Celsius, 21, 26-27, 38  
   thermodynamique, 18, 20-21, 24, 44, 97, 98, 99, 101, 104  
 temps  
   durée, 18, 24, 33, 38, 43, 99, 100, 102  
   atomique international (TAI), 61-62  
   universel coordonné (UTC), 62-63  
 tesla (T), 26, 55  
 Thomson, 100  
 tonne, 33-34, 51 ; métrique, 34



**U**

## unité(s)

- absolues, 103
  - astronomique, 33
  - ayant des noms spéciaux et des symboles
    - particuliers, 28, 29, 61, 64, 67, 72
  - de base, 13, 14, 17, 18-23, 25, 27, 52, 53, 54, 60, 65, 70, 71, 72, 80, 82, 92, 97, 98, 99, 100-102 ; définitions, 17-30
  - dérivées, 13, 14, 17, 25-29, 40, 45
  - dérivées cohérentes, 20, 25-29
  - électriques, 10, 44, 100, 103
  - en dehors du SI, 33-34
  - des grandeurs biologiques, 28-30
  - internationales OMS, 30
  - multiples et sous-multiples des, 25, 27, 31-32, 54, 57, 60, 63, 70, 72
  - noms, 35
  - photométriques, 48, 59
  - pratiques, 100
  - réalisation, 10, 11, 13, 14, 16, 23, 30
  - règles d'écriture, 35
  - SI, 17-30, 72
  - supplémentaires, 40, 55, 60, 65, 70-71, 99, 101
  - symboles, 35, 37, 51
- UTC, *voir* Temps universel coordonné

**V**

- vérification du kilogramme, 103
- viscosité
  - cinématique (stokes), 55
  - dynamique (poise), 28, 55
- vision
  - mésopique, 64
  - photopique, 64
  - scotopique, 64
- vitesse de la lumière dans le vide, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 62, 66, 73, 82, 84, 85, 92, 94, 97, 98, 101, 102
- volt (V), 26, 49, 51, 55, 67, 68, 69, 85, 93, 100, 103
- von Klitzing, *voir* constante de

**W**

- watt (W), 16, 26, 49, 55, 84, 92
- Weber, 100
- weber (Wb), 26, 49, 55

**Y**

- yard, 34







---

**Bureau International  
des Poids et Mesures**

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

**9th edition      2019**

---

v1.08

#### Copyright statement

The SI Brochure is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

## The BIPM and the Metre Convention

The International Bureau of Weights and Measures (BIPM) was set up by the Metre Convention signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

The BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m<sup>2</sup>) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Metre Convention.

The task of the BIPM is to ensure worldwide unification of measurements; its objectives are to:

- represent the world-wide measurement community, aiming to maximize its uptake and impact,
- be a centre for scientific and technical collaboration between Member States, providing capabilities for international measurement comparisons on a shared-cost basis,
- be the coordinator of the world-wide measurement system, ensuring it gives comparable and internationally accepted measurement results.

The BIPM operates under the exclusive supervision of the International Committee for Weights and Measures (CIPM) which itself comes under the authority of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) and reports to it on the work accomplished by the BIPM.

Delegates from all Member States attend the General Conference, which normally meets every four years. The function of these meetings is to:

- discuss and initiate the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirm the results of new fundamental metrological determinations and various scientific resolutions of international scope;
- take all major decisions concerning the finance, organization and development of the BIPM.

The CIPM has eighteen members each from a different State: at present, it meets every year. The officers of this committee present an annual report on the administrative and financial position of the BIPM to the Governments of the Member States. The principal task of the CIPM is to ensure worldwide uniformity in units of measurement. It does this by direct action or by submitting proposals to the CGPM.

As of 20 May 2019 there were fifty nine Member States: Argentina, Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Canada, Chile, China, Colombia, Croatia, Czech Republic, Denmark, Egypt, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, India, Indonesia, Iran (Islamic Rep. of), Iraq, Ireland, Israel, Italy, Japan, Kazakhstan, Kenya, Korea (Republic of), Lithuania, Malaysia, Mexico, Montenegro, Netherlands, New Zealand, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Russian Federation, Saudi Arabia, Serbia, Singapore, Slovakia, Slovenia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Tunisia, Turkey, Ukraine, United Arab Emirates, United Kingdom, United States of America and Uruguay

Forty-two States and Economies were Associates of the General Conference: Albania, Azerbaijan, Bangladesh, Belarus, Bolivia, Bosnia and Herzegovina, Botswana, CARICOM, Chinese Taipei, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Estonia, Ethiopia, Georgia, Ghana, Hong Kong (China), Jamaica, Kuwait, Latvia, Luxembourg, Malta, Mauritius, Moldova (Republic of), Mongolia, Namibia, North Macedonia, Oman, Panama, Paraguay, Peru, Philippines, Qatar, Seychelles, Sri Lanka, Sudan, Syrian Arab Republic, Tanzania (United Republic of), Uzbekistan, Viet Nam, Zambia, and Zimbabwe

The activities of the BIPM, which in the beginning were limited to measurements of length and mass, and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement of electricity (1927), photometry and radiometry (1937), ionizing radiation (1960), time scales (1988) and to chemistry (2000). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929; new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories, in 1984 for the laser work and in 1988 for a library and offices. In 2001 a new building for the workshop, offices and meeting rooms was opened.

Some forty-five physicists and technicians work in the BIPM laboratories. They mainly conduct metrological research, international comparisons of realizations of units and calibrations of standards. An annual Director's report gives details of the work in progress.

Following the extension of the work entrusted to the BIPM in 1927, the CIPM has set up bodies, known as Consultative Committees, whose function is to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These Consultative Committees, which may form temporary or permanent working groups to study special topics, are responsible for coordinating the international work carried out in their respective fields and for proposing recommendations to the CIPM concerning units.

The Consultative Committees have common regulations (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). They meet at irregular intervals. The president of each Consultative Committee is designated by the CIPM and is normally a member of the CIPM. The members of the Consultative Committees are metrology laboratories and specialized institutes, agreed by the CIPM, which send delegates of their choice. In addition, there are individual members appointed by the CIPM, and a representative of the BIPM (Document CIPM-D-01, *Rules of procedure for the Consultative Committees (CCs) created by the CIPM, CC working groups and CC workshops*). At present, there are ten such committees:

1. The Consultative Committee for Electricity and Magnetism (CCEM), new name given in 1997 to the Consultative Committee for Electricity (CCE) set up in 1927;
2. The Consultative Committee for Photometry and Radiometry (CCPR), new name given in 1971 to the Consultative Committee for Photometry (CCP) set up in 1933 (between 1930 and 1933 the CCE dealt with matters concerning photometry);
3. The Consultative Committee for Thermometry (CCT), set up in 1937;
4. The Consultative Committee for Length (CCL), new name given in 1997 to the Consultative Committee for the Definition of the Metre (CCDM), set up in 1952;
5. The Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF), new name given in 1997 to the Consultative Committee for the Definition of the Second (CCDS) set up in 1956;
6. The Consultative Committee for Ionizing Radiation (CCRI), new name given in 1997 to the Consultative Committee for Standards of Ionizing Radiation (CCEMRI) set up in 1958 (in 1969 this committee established four sections: Section I (X- and  $\gamma$ -rays, electrons), Section II (Measurement of radionuclides), Section III (Neutron measurements), Section IV ( $\alpha$ -energy standards); in 1975 this last section was dissolved and Section II was made responsible for its field of activity);
7. The Consultative Committee for Units (CCU), set up in 1964 (this committee replaced the Commission for the System of Units set up by the CIPM in 1954);



8. The Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM), set up in 1980;
9. The Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM), set up in 1993;
10. The Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration (CCAUV), set up in 1999.

The proceedings of the General Conference and the CIPM are published by the BIPM in the following series:

- *Report of the meeting of the General Conference on Weights and Measures;*
- *Report of the meeting of the International Committee for Weights and Measures.*

The CIPM decided in 2003 that the reports of meetings of the Consultative Committees should no longer be printed, but would be placed on the BIPM website, in their original language.

The BIPM also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title The International System of Units (SI), a brochure, periodically updated, in which are collected all the decisions and recommendations concerning units.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) and the *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (11 volumes published between 1966 and 1988) ceased by a decision of the CIPM.

The scientific work of the BIPM is published in the open scientific literature.

Since 1965 *Metrologia*, an international journal published under the auspices of the CIPM, has printed articles dealing with scientific metrology, improvements in methods of measurement, work on standards and units, as well as reports concerning the activities, decisions and recommendations of the various bodies created under the Metre Convention.

# The International System of Units

# Contents

<b>Preface to the 9th edition</b>	<b>122</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>125</b>
1.1 The SI and the defining constants	125
1.2 Motivation for the use of defining constants to define the SI	125
1.3 Implementation of the SI	126
<b>2 The International System of Units</b>	<b>127</b>
2.1 Defining the unit of a quantity	127
2.2 Definition of the SI	127
2.2.1 The nature of the seven defining constants	128
2.3 Definitions of the SI units	129
2.3.1 Base units	130
2.3.2 Practical realization of SI units	135
2.3.3 Dimensions of quantities	136
2.3.4 Derived units	137
2.3.5 Units for quantities that describe biological and physiological effects	141
2.3.6 SI units in the framework of the general theory of relativity	141
<b>3 Decimal multiples and sub-multiples of SI units</b>	<b>143</b>
<b>4 Non-SI units that are accepted for use with the SI</b>	<b>145</b>
<b>5 Writing unit symbols and names, and expressing the values of quantities</b>	<b>147</b>
5.1 The use of unit symbols and names	147
5.2 Unit symbols	147
5.3 Unit names	148
5.4 Rules and style conventions for expressing values of quantities	148
5.4.1 Value and numerical value of a quantity, and the use of quantity calculus	148
5.4.2 Quantity symbols and unit symbols	149
5.4.3 Formatting the value of a quantity	149
5.4.4 Formatting numbers, and the decimal marker	150
5.4.5 Expressing the measurement uncertainty in the value of a quantity	150
5.4.6 Multiplying or dividing quantity symbols, the values of quantities, or numbers	150
5.4.7 Stating quantity values being pure numbers	151
5.4.8 Plane angles, solid angles and phase angles	151

<b>Appendix 1.</b>	<b>Decisions of the CGPM and the CIPM</b>	<b>152</b>
<b>Appendix 2.</b>	<b>Practical realization of the definitions of some important units</b>	<b>200</b>
<b>Appendix 3.</b>	<b>Units for photochemical and photobiological quantities</b>	<b>201</b>
<b>Appendix 4.</b>	<b>Historical notes on the development of the International System of Units and its base units</b>	<b>202</b>
	Part 1. The historical development of the realization of SI units	202
	Part 2. The historical development of the International System	204
	Part 3. Historical perspective on the base units	206
	<b>List of acronyms</b>	<b>211</b>
	<b>Index</b>	<b>213</b>

## Preface to the 9th edition

The International System of Units, the SI, has been used around the world as the preferred system of units, the basic language for science, technology, industry and trade since it was established in 1960 by a resolution at the 11th meeting of the *Conférence Générale des Poids et Mesures*, the CGPM (known in English as the General Conference on Weights and Measures).

This brochure is published by the Bureau International des Poids et Mesures, the BIPM (known in English as the International Bureau of Weights and Measures) to promote and explain the SI. It lists the most significant Resolutions of the CGPM and decisions of the *Comité International des Poids et Mesures*, the CIPM (known in English as the International Committee on Weights and Measures) that concern the metric system going back to the 1st meeting of the CGPM in 1889.

The SI has always been a practical and dynamic system that has evolved to exploit the latest scientific and technological developments. In particular, the tremendous advances in atomic physics and quantum metrology made over the last 50 years have enabled the definitions of the second, the metre, and the practical representation of the electrical units to take advantage of atomic and quantum phenomena to achieve levels of accuracy for realizing the respective units limited only by our technical capability and not by the definitions themselves. These advances in science together with developments in measurement technology have enabled changes to the SI which have been promoted and explained in the previous editions of this brochure.

This 9th edition of the SI brochure has been prepared following the adoption by the 26th meeting of the CGPM of a set of far-reaching changes. The meeting introduced a new approach to articulating the definitions of the units in general, and of the seven base units in particular, by fixing the numerical values of seven “defining” constants. Among them are fundamental constants of nature such as the Planck constant and the speed of light, so that the definitions are based on and represent our present understanding of the laws of physics. For the first time, a complete set of definitions is available that does not make reference to any artefact standards, material properties or measurement descriptions. These changes enable the realization of all units with an accuracy that is ultimately limited only by the quantum structure of nature and our technical abilities but not by the definitions themselves. Any valid equation of physics relating the defining constants to a unit can be used to realize the unit thus creating opportunities for innovation, realization everywhere with increasing accuracy as technology proceeds. Thus, this redefinition marks a significant and historic step forward.

The changes were agreed by the CGPM in November 2018 with effect from May 20th 2019, a date chosen because it is World Metrology Day, the day when the *Metre Convention* was signed in 1875. Whilst the future impact of the changes will be far reaching, great attention has been paid to ensure that these definitions are consistent with those in place at the time the change was implemented.

We draw attention to the fact that since its establishment in 1960, the International System of Units has always been referred to as “the SI” in its shortened form. This principle has been maintained in the eight previous editions of this brochure and was reaffirmed in Resolution 1 adopted at the 26th meeting of the CGPM, which also confirmed that the title of this brochure is simply “The International System of Units”. This consistency of reference to the SI reflects the efforts of the CGPM and the CIPM to ensure the continuity of the values of measurements expressed in SI units through each change that has been made.

The text of this brochure has been prepared in order to provide a full description of the SI and to provide some historical background. It also has four appendices:

Appendix 1 reproduces, in chronological order, all of the decisions (Resolutions, Recommendations, Declarations) promulgated since 1889 by the CGPM and the CIPM on units of measurement and the International System of Units.

Appendix 2 is only available in an electronic version ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). It outlines the practical realization of the seven base units and other important units in each field. This appendix will be updated regularly to reflect improvements in the experimental techniques available for realizing the units.

Appendix 3 is only available in an electronic version ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). It discusses units for photochemical and photobiological quantities.

Appendix 4 provides some notes on the history of the development of the SI.

We conclude by expressing our thanks to the members of the Comité Consultatif des Unités of the CIPM, the CCU (known in English as the Consultative Committee for Units), who were responsible for drafting this brochure. Both the CCU and the CIPM have approved the final text.

March 2019



B. Inglis

President, CIPM



J. Ullrich

President, CCU



M.J.T. Milton

Director, BIPM

Note on the text

The 22nd meeting of the CGPM decided, in 2003, following a decision of the CIPM in 1997, that "the symbol for the decimal marker shall be either the point on the line or the comma on the line". Following this decision, and following custom in the two languages, in this edition the point on the line is used as a decimal marker in the English text, and a comma on the line is used in the French text. This has no implication for the translation of the decimal marker into other languages. Small spelling variations occur in the language of the English speaking countries (for instance, "metre" and "meter", "litre" and "liter"). In this respect, the English text presented here follows the ISO/IEC 80000 series *Quantities and units*. However, the symbols for SI units used in this brochure are the same in all languages.

Readers should note that the official record of the meetings of the CGPM and the sessions of the CIPM is that of the French text. This brochure provides the text in English, but when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text the French should be used.

# 1 Introduction

## 1.1 The SI and the defining constants

This brochure presents information on the definition and use of the International System of Units, universally known as the SI (from the French *Système international d'unités*), for which the General Conference on Weights and Measures (CGPM) has responsibility. In 1960 the 11th CGPM formally defined and established the SI and has subsequently revised it from time to time in response to the requirements of users and advances in science and technology. The most recent and perhaps the most significant revision of the SI since its establishment was made by the 26th CGPM (2018) and is documented in this 9th edition of the SI Brochure. The Metre Convention and its organs, the CGPM, the Comité International des Poids et Mesures (CIPM), the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), and the Consultative Committees are described in the text “The BIPM and the Metre Convention” on page 117.

The SI is a consistent system of units for use in all aspects of life, including international trade, manufacturing, security, health and safety, protection of the environment, and in the basic science that underpins all of these. The system of quantities underlying the SI and the equations relating them are based on the present description of nature and are familiar to all scientists, technologists and engineers.

The definition of the SI units is established in terms of a set of seven defining constants. The complete system of units can be derived from the fixed values of these defining constants, expressed in the units of the SI. These seven defining constants are the most fundamental feature of the definition of the entire system of units. These particular constants were chosen after having been identified as being the best choice, taking into account the previous definition of the SI, which was based on seven base units, and progress in science.

A variety of experimental methods described by the CIPM Consultative Committees may be used to realize the definitions. Descriptions of these realizations are also referred to as “*mises en pratique*”. Realizations may be revised whenever new experiments are developed; for this reason advice on realizing the definitions is not included in this brochure but is available on the BIPM website.

## 1.2 Motivation for the use of defining constants to define the SI

Historically, SI units have been presented in terms of a set of – most recently seven – *base units*. All other units, described as *derived units*, are constructed as products of powers of the base units.

Different types of definitions for the base units have been used: specific properties of artefacts such as the mass of the international prototype for the unit kilogram; a specific physical state such as the triple point of water for the unit kelvin; idealized experimental prescriptions as in the case of the ampere and the candela; or constants of nature such as the speed of light for the definition of the unit metre.

To be of any practical use, these units not only have to be defined, but they also have to be realized physically for dissemination. In the case of an artefact, the definition and the realization are equivalent – a path that was pursued by advanced ancient civilizations. Although this is simple and clear, artefacts involve the risk of loss, damage or change. The other types of unit definitions are increasingly abstract or idealized. Here, the realizations are separated conceptually from the definitions so that the units can, as a matter of principle, be realized independently at any place and at any time. In addition, new and superior realizations may be introduced as science and technologies develop, without the need to redefine the unit. These advantages – most obviously seen with the history of the definition of the metre from artefacts through an atomic reference transition to the fixed numerical value of the speed of light – led to the decision to define all units by using defining constants.

The choice of the base units was never unique, but grew historically and became familiar to users of the SI. This description in terms of base and derived units is maintained in the present definition of the SI, but has been reformulated as a consequence of adoption of the defining constants.

### **1.3 Implementation of the SI**

The definitions of the SI units, as decided by the CGPM, represent the highest reference level for measurement traceability to the SI.

Metrology institutes around the world establish the practical realizations of the definitions in order to allow for traceability of measurements to the SI. The Consultative Committees provide the framework for establishing the equivalence of the realizations in order to harmonize traceability world-wide.

Standardization bodies may specify further details for quantities and units and rules for their application, where these are needed by interested parties. Whenever SI units are involved, these standards must refer to the definitions by the CGPM. Many such specifications are listed for example in the standards developed by the International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission (ISO/IEC 80000 series of international standards).

Individual countries have established rules concerning the use of units by national legislation, either for general use or for specific areas such as commerce, health, public safety and education. In almost all countries, this legislation is based on the SI. The International Organization of Legal Metrology (OIML) is charged with the international harmonization of the technical specifications of this legislation.



## 2 The International System of Units

### 2.1 Defining the unit of a quantity

The value of a quantity is generally expressed as the product of a number and a unit. The unit is simply a particular example of the quantity concerned which is used as a reference, and the number is the ratio of the value of the quantity to the unit.

For a particular quantity different units may be used. For example, the value of the speed  $v$  of a particle may be expressed as  $v = 25 \text{ m/s}$  or  $v = 90 \text{ km/h}$ , where metre per second and kilometre per hour are alternative units for the same value of the quantity speed.

Before stating the result of a measurement, it is essential that the quantity being presented is adequately described. This may be simple, as in the case of the length of a particular steel rod, but can become more complex when higher accuracy is required and where additional parameters, such as temperature, need to be specified.

When a measurement result of a quantity is reported, the *estimated value* of the measurand (the quantity to be measured), and the *uncertainty* associated with that value, are necessary. Both are expressed in the same unit.

For example, the speed of light in vacuum is a constant of nature, denoted by  $c$ , whose value in SI units is given by the relation  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  where the numerical value is 299 792 458 and the unit is  $\text{m/s}$ .

### 2.2 Definition of the SI

As for any quantity, the value of a fundamental constant can be expressed as the product of a number and a unit.

The definitions below specify the exact numerical value of each constant when its value is expressed in the corresponding SI unit. By fixing the exact numerical value, the unit becomes defined, since the product of the *numerical value* and the *unit* has to equal the *value* of the constant, which is postulated to be invariant.

The seven constants are chosen in such a way that any unit of the SI can be written either through a defining constant itself or through products or quotients of defining constants.

Quotients of SI units may be expressed using either a solidus (/) or a negative exponent ( $^{-}$ )

For example,  
 $\text{m/s} = \text{m s}^{-1}$   
 $\text{mol/mol} = \text{mol mol}^{-1}$

**The International System of Units, the SI, is the system of units in which**

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum,  $c$ , is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant,  $h$ , is  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- the elementary charge,  $e$ , is  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,
- the Boltzmann constant,  $k$ , is  $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,
- the Avogadro constant,  $N_{\text{A}}$ , is  $6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ,  $K_{\text{cd}}$ , is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

The numerical values of the seven defining constants have no uncertainty.

**Table 1. The seven defining constants of the SI and the seven corresponding units they define**

Defining constant	Symbol	Numerical value	Unit
hyperfine transition frequency of Cs	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	9 192 631 770	Hz
speed of light in vacuum	$c$	299 792 458	$\text{m s}^{-1}$
Planck constant	$h$	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s
elementary charge	$e$	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C
Boltzmann constant	$k$	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\text{J K}^{-1}$
Avogadro constant	$N_{\text{A}}$	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	$\text{mol}^{-1}$
luminous efficacy	$K_{\text{cd}}$	683	$\text{lm W}^{-1}$

Preserving continuity, as far as possible, has always been an essential feature of any changes to the International System of Units. The numerical values of the defining constants have been chosen to be consistent with the earlier definitions in so far as advances in science and knowledge allow.

### 2.2.1 The nature of the seven defining constants

The nature of the defining constants ranges from fundamental constants of nature to technical constants.

The use of a constant to define a unit disconnects definition from realization. This offers the possibility that completely different or new and superior practical realizations can be developed, as technologies evolve, without the need to change the definition.

A technical constant such as  $K_{\text{cd}}$ , the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz refers to a special application. In principle, it can be chosen freely, such as to include conventional physiological or other weighting factors. In contrast, the use of a fundamental constant of nature, in general, does not allow this choice because it is related to other constants through the equations of physics.

The set of seven defining constants has been chosen to provide a fundamental, stable and universal reference that simultaneously allows for practical realizations with the smallest uncertainties. The technical conventions and specifications also take historical developments into account.

Both the Planck constant  $h$  and the speed of light in vacuum  $c$  are properly described as fundamental. They determine quantum effects and space-time properties, respectively, and affect all particles and fields equally on all scales and in all environments.

The elementary charge  $e$  corresponds to a coupling strength of the electromagnetic force via the fine-structure constant  $\alpha = e^2/(2c\epsilon_0 h)$  where  $\epsilon_0$  is the vacuum electric permittivity or electric constant. Some theories predict a variation of  $\alpha$  over time. The experimental limits of the maximum possible variation in  $\alpha$  are so low, however, that any effect on foreseeable practical measurements can be excluded.

The Boltzmann constant  $k$  is a proportionality constant between the quantities temperature (with unit kelvin) and energy (with unit joule), whereby the numerical value is obtained from historical specifications of the temperature scale. The temperature of a system scales with the thermal energy, but not necessarily with the internal energy of a system. In statistical physics the Boltzmann constant connects the entropy  $S$  with the number  $\Omega$  of quantum-mechanically accessible states,  $S = k \ln \Omega$ .

The caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, has the character of an atomic parameter, which may be affected by the environment, such as electromagnetic fields. However, the underlying transition is well understood, stable and a good choice as a reference transition under practical considerations. The choice of an atomic parameter like  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  does not disconnect definition and realization in the same way that  $h$ ,  $c$ ,  $e$ , or  $k$  do, but specifies the reference.

The Avogadro constant  $N_{\text{A}}$  is a proportionality constant between the quantity amount of substance (with unit mole) and the quantity for counting entities (with unit one, symbol 1). Thus it has the character of a constant of proportionality similar to the Boltzmann constant  $k$ .

The luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , is a technical constant that gives an exact numerical relationship between the purely physical characteristics of the radiant power stimulating the human eye (W) and its photobiological response defined by the luminous flux due to the spectral responsivity of a standard observer (lm) at a frequency of  $540 \times 10^{12}$  hertz.

## 2.3 Definitions of the SI units

Prior to the definitions adopted in 2018, the SI was defined through seven *base units* from which the *derived units* were constructed as products of powers of the *base units*. Defining the SI by fixing the numerical values of seven defining constants has the effect that this distinction is, in principle, not needed, since all units, *base* as well as *derived units*, may be constructed directly from the defining constants. Nevertheless, the concept of base and derived units is maintained because it is useful and historically well established, noting also that the ISO/IEC 80000 series of Standards specify base and derived quantities which necessarily correspond to the SI base and derived units defined here.

2.3.1 Base units

The base units of the SI are listed in Table 2.

Table 2. SI base units

Base quantity		Base unit	
Name	Typical symbol	Name	Symbol
time	<i>t</i>	second	s
length	<i>l, x, r, etc.</i>	metre	m
mass	<i>m</i>	kilogram	kg
electric current	<i>I, i</i>	ampere	A
thermodynamic temperature	<i>T</i>	kelvin	K
amount of substance	<i>n</i>	mole	mol
luminous intensity	<i>I<sub>v</sub></i>	candela	cd

The symbols for quantities are generally single letters of the Latin or Greek alphabets, printed in an italic font, and are *recommendations*. The symbols for units are printed in an upright (roman) font and are *mandatory*, see chapter 5.

Starting from the definition of the SI in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by using, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions:

The second

**The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to  $\text{s}^{-1}$ .**

This definition implies the exact relation  $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ . Inverting this relation gives an expression for the unit second in terms of the defining constant  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}}}{9\,192\,631\,770} \quad \text{or} \quad 1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

The effect of this definition is that the second is equal to the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the unperturbed ground state of the  $^{133}\text{Cs}$  atom.

The reference to an unperturbed atom is intended to make it clear that the definition of the SI second is based on an isolated caesium atom that is unperturbed by any external field, such as ambient black-body radiation.

The second, so defined, is the unit of proper time in the sense of the general theory of relativity. To allow the provision of a coordinated time scale, the signals of different primary clocks in different locations are combined, which have to be corrected for relativistic caesium frequency shifts (see section 2.3.6).

The CIPM has adopted various secondary representations of the second, based on a selected number of spectral lines of atoms, ions or molecules. The unperturbed frequencies of these lines can be determined with a relative uncertainty not lower than that of the realization of the second based on the  $^{133}\text{Cs}$  hyperfine transition frequency, but some can be reproduced with superior stability.

### The metre

**The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum,  $c$ , to be 299 792 458 when expressed in the unit  $\text{m s}^{-1}$ , where the second is defined in terms of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

This definition implies the exact relation  $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ . Inverting this relation gives an exact expression for the metre in terms of the defining constants  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ m} = \left( \frac{c}{299\,792\,458} \right) \text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{299\,792\,458} \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}} \approx 30.663\,319 \frac{c}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}.$$

The effect of this definition is that one metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval with duration of  $1/299\,792\,458$  of a second.

### The kilogram

**The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant,  $h$ , to be  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit  $\text{J s}$ , which is equal to  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

This definition implies the exact relation  $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Inverting this relation gives an exact expression for the kilogram in terms of the three defining constants  $h$ ,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  and  $c$ :

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6.626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^{-2} \text{ s}$$

which is equal to

$$1 \text{ kg} = \frac{(299\,792\,458)^2}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34})(9\,192\,631\,770)} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \approx 1.475\,5214 \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}.$$

The effect of this definition is to define the unit  $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$  (the unit of both the physical quantities action and angular momentum). Together with the definitions of the second and the metre this leads to a definition of the unit of mass expressed in terms of the Planck constant  $h$ .

The previous definition of the kilogram fixed the value of the mass of the international prototype of the kilogram,  $m(\mathcal{K})$ , to be equal to one kilogram exactly and the value of the Planck constant  $h$  had to be determined by experiment. The present definition fixes the numerical value of  $h$  exactly and the mass of the prototype has now to be determined by experiment.

The number chosen for the numerical value of the Planck constant in this definition is such that at the time of its adoption, the kilogram was equal to the mass of the international prototype,  $m(\mathcal{K}) = 1 \text{ kg}$ , with a relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-8}$ , which was the standard uncertainty of the combined best estimates of the value of the Planck constant at that time.

Note that with the present definition, primary realizations can be established, in principle, at any point in the mass scale.

### The ampere

**The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge,  $e$ , to be  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

This definition implies the exact relation  $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  A s. Inverting this relation gives an exact expression for the unit ampere in terms of the defining constants  $e$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ A} = \left( \frac{e}{1.602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1}$$

which is equal to

$$1 \text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1.602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6.789\,6868 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e.$$

The effect of this definition is that one ampere is the electric current corresponding to the flow of  $1/(1.602\,176\,634 \times 10^{-19})$  elementary charges per second.

The previous definition of the ampere was based on the force between two current carrying conductors and had the effect of fixing the value of the vacuum magnetic permeability  $\mu_0$  (also known as the magnetic constant) to be exactly  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ , where H and N denote the coherent derived units henry and newton, respectively. The new definition of the ampere fixes the value of  $e$  instead of  $\mu_0$ . As a result,  $\mu_0$  must be determined experimentally.

It also follows that since the vacuum electric permittivity  $\epsilon_0$  (also known as the electric constant), the characteristic impedance of vacuum  $Z_0$ , and the admittance of vacuum  $Y_0$  are equal to  $1/\mu_0 c^2$ ,  $\mu_0 c$ , and  $1/\mu_0 c$ , respectively, the values of  $\epsilon_0$ ,  $Z_0$ , and  $Y_0$  must now also be determined experimentally, and are affected by the same relative standard uncertainty as  $\mu_0$  since  $c$  is exactly known. The product  $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  and quotient  $Z_0/\mu_0 = c$  remain exact. At the time of adopting the present definition of the ampere,  $\mu_0$  was equal to  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  with a relative standard uncertainty of  $2.3 \times 10^{-10}$ .

## The kelvin

The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant,  $k$ , to be  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  when expressed in the unit  $\text{J K}^{-1}$ , which is equal to  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

This definition implies the exact relation  $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ . Inverting this relation gives an exact expression for the kelvin in terms of the defining constants  $k$ ,  $h$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ K} = \left( \frac{1.380\,649 \times 10^{-23}}{k} \right) \text{ kg m}^2 \text{s}^{-2}$$

which is equal to

$$1 \text{ K} = \frac{1.380\,649 \times 10^{-23}}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)} \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k} \approx 2.266\,6653 \frac{\Delta\nu_{\text{Cs}} h}{k}.$$

The effect of this definition is that one kelvin is equal to the change of thermodynamic temperature that results in a change of thermal energy  $kT$  by  $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$ .

The previous definition of the kelvin set the temperature of the triple point of water,  $T_{\text{TPW}}$ , to be exactly 273.16 K. Due to the fact that the present definition of the kelvin fixes the numerical value of  $k$  instead of  $T_{\text{TPW}}$ , the latter must now be determined experimentally. At the time of adopting the present definition  $T_{\text{TPW}}$  was equal to 273.16 K with a relative standard uncertainty of  $3.7 \times 10^{-7}$  based on measurements of  $k$  made prior to the redefinition.

As a result of the way temperature scales used to be defined, it remains common practice to express a thermodynamic temperature, symbol  $T$ , in terms of its difference from the reference temperature  $T_0 = 273.15 \text{ K}$ , close to the ice point. This difference is called the Celsius temperature, symbol  $t$ , which is defined by the quantity equation

$$t = T - T_0.$$

The unit of Celsius temperature is the degree Celsius, symbol  $^{\circ}\text{C}$ , which is by definition equal in magnitude to the unit kelvin. A difference or interval of temperature may be expressed in kelvin or in degrees Celsius, the numerical value of the temperature difference being the same in either case. However, the numerical value of a Celsius temperature expressed in degrees Celsius is related to the numerical value of the thermodynamic temperature expressed in kelvin by the relation

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

(see 5.4.1 for an explanation of the notation used here).

The kelvin and the degree Celsius are also units of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the CIPM in 1989 in Recommendation 5 (CI-1989, PV, **57**, 115). Note that the ITS-90 defines two quantities  $T_{90}$  and  $t_{90}$  which are close approximations to the corresponding thermodynamic temperatures  $T$  and  $t$ .

Note that with the present definition, primary realizations of the kelvin can, in principle, be established at any point of the temperature scale.

### The mole

The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant,  $N_A$ , when expressed in the unit  $\text{mol}^{-1}$  and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol  $n$ , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

This definition implies the exact relation  $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Inverting this relation gives an exact expression for the mole in terms of the defining constant  $N_A$ :

$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6.022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right).$$

The effect of this definition is that the mole is the amount of substance of a system that contains  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  specified elementary entities.

The previous definition of the mole fixed the value of the molar mass of carbon 12,  $M(^{12}\text{C})$ , to be exactly 0.012 kg/mol. According to the present definition  $M(^{12}\text{C})$  is no longer known exactly and must be determined experimentally. The value chosen for  $N_A$  is such that at the time of adopting the present definition of the mole,  $M(^{12}\text{C})$  was equal to 0.012 kg/mol with a relative standard uncertainty of  $4.5 \times 10^{-10}$ .

The molar mass of any atom or molecule X may still be obtained from its relative atomic mass from the equation

$$M(\text{X}) = A_r(\text{X}) [M(^{12}\text{C})/12] = A_r(\text{X}) M_u$$

and the molar mass of any atom or molecule X is also related to the mass of the elementary entity  $m(\text{X})$  by the relation

$$M(\text{X}) = N_A m(\text{X}) = N_A A_r(\text{X}) m_u.$$

In these equations  $M_u$  is the molar mass constant, equal to  $M(^{12}\text{C})/12$  and  $m_u$  is the unified atomic mass constant, equal to  $m(^{12}\text{C})/12$ . They are related to the Avogadro constant through the relation

$$M_u = N_A m_u.$$

In the name “amount of substance”, the word “substance” will typically be replaced by words to specify the substance concerned in any particular application, for example “amount of hydrogen chloride”, or “amount of benzene”. It is important to give a precise definition of the entity involved (as emphasized in the definition of the mole); this should preferably be done by specifying the molecular chemical formula of the material involved. Although the word “amount” has a more general dictionary definition, the abbreviation of the full name “amount of substance” to “amount” may be used for brevity. This also applies to derived quantities such as “amount-of-substance concentration”, which may simply be called “amount concentration”. In the field of clinical chemistry, the name “amount-of-substance concentration” is generally abbreviated to “substance concentration”.



### The candela

The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , to be 683 when expressed in the unit  $\text{lm W}^{-1}$ , which is equal to  $\text{cd sr W}^{-1}$ , or  $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$ , where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

This definition implies the exact relation  $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$  for monochromatic radiation of frequency  $\nu = 540 \times 10^{12}$  Hz. Inverting this relation gives an exact expression for the candela in terms of the defining constants  $K_{\text{cd}}$ ,  $h$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ :

$$1 \text{ cd} = \left( \frac{K_{\text{cd}}}{683} \right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1}$$

which is equal to

$$1 \text{ cd} = \frac{1}{(6.626\,070\,15 \times 10^{-34}) (9\,192\,631\,770)^2 683} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}$$

$$\approx 2.614\,8305 \times 10^{10} (\Delta\nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}.$$

The effect of this definition is that one candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz and has a radiant intensity in that direction of  $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ . The definition of the steradian is given below Table 4.

### 2.3.2 Practical realization of SI units

The highest-level experimental methods used for the realization of units using the equations of physics are known as primary methods. The essential characteristic of a primary method is that it allows a quantity to be measured in a particular unit by using only measurements of quantities that do not involve that unit. In the present formulation of the SI, the basis of the definitions is different from that used previously, so that new methods may be used for the practical realization of SI units.

Instead of each definition specifying a particular condition or physical state, which sets a fundamental limit to the accuracy of realization, a user is now free to choose any convenient equation of physics that links the defining constants to the quantity intended to be measured. This is a much more general way of defining the basic units of measurement. It is not limited by today's science or technology; future developments may lead to different ways of realizing units to a higher accuracy. When defined this way, there is, in principle, no limit to the accuracy with which a unit might be realized. The exception remains the definition of the second, in which the original microwave transition of caesium must remain, for the time being, the basis of the definition. For a more comprehensive explanation of the realization of SI units see Appendix 2.

### 2.3.3 Dimensions of quantities

Physical quantities can be organized in a system of dimensions, where the system used is decided by convention. Each of the seven base quantities used in the SI is regarded as having its own dimension. The symbols used for the base quantities and the symbols used to denote their dimension are shown in Table 3.

**Table 3. Base quantities and dimensions used in the SI**

Base quantity	Typical symbol for quantity	Symbol for dimension
time	$t$	T
length	$l, x, r$ , etc.	L
mass	$m$	M
electric current	$I, i$	I
thermodynamic temperature	$T$	Θ
amount of substance	$n$	N
luminous intensity	$I_v$	J

All other quantities, with the exception of counts, are derived quantities, which may be written in terms of base quantities according to the equations of physics. The dimensions of the derived quantities are written as products of powers of the dimensions of the base quantities using the equations that relate the derived quantities to the base quantities. In general the dimension of any quantity  $Q$  is written in the form of a dimensional product,

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

where the exponents  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$  and  $\eta$ , which are generally small integers, which can be positive, negative, or zero, are called the dimensional exponents.

There are quantities  $Q$  for which the defining equation is such that all of the dimensional exponents in the equation for the dimension of  $Q$  are zero. This is true in particular for any quantity that is defined as the ratio of two quantities of the same kind. For example, the refractive index is the ratio of two speeds and the relative permittivity is the ratio of the permittivity of a dielectric medium to that of free space. Such quantities are simply numbers. The associated unit is the unit one, symbol 1, although this is rarely explicitly written (see 5.4.7).

There are also some quantities that cannot be described in terms of the seven base quantities of the SI, but have the nature of a count. Examples are a number of molecules, a number of cellular or biomolecular entities (for example copies of a particular nucleic acid sequence), or degeneracy in quantum mechanics. Counting quantities are also quantities with the associated unit one.

The unit one is the neutral element of any system of units – necessary and present automatically. There is no requirement to introduce it formally by decision. Therefore, a formal traceability to the SI can be established through appropriate, validated measurement procedures.

Plane and solid angles, when expressed in radians and steradians respectively, are in effect also treated within the SI as quantities with the unit one (see section 5.4.8). The symbols rad and sr are written explicitly where appropriate, in order to emphasize that, for radians or steradians, the quantity being considered is, or involves the plane angle or solid angle respectively. For steradians it emphasizes the distinction between units of flux and intensity in radiometry and photometry for example. However, it is a long-established practice in mathematics and across all areas of science to make use of  $\text{rad} = 1$  and  $\text{sr} = 1$ . For historical reasons the radian and steradian are treated as derived units, as described in section 2.3.4.

It is especially important to have a clear description of any quantity with unit one (see section 5.4.7) that is expressed as a ratio of quantities of the same kind (for example length ratios or amount fractions) or as a count (for example number of photons or decays).

### 2.3.4 Derived units

Derived units are defined as products of powers of the base units. When the numerical factor of this product is one, the derived units are called *coherent derived units*. The base and coherent derived units of the SI form a coherent set, designated the *set of coherent SI units*. The word “coherent” here means that equations between the numerical values of quantities take exactly the same form as the equations between the quantities themselves.

Some of the coherent derived units in the SI are given special names. Table 4 lists 22 SI units with special names. Together with the seven base units (Table 2) they form the core of the set of SI units. All other SI units are combinations of some of these 29 units.

It is important to note that any of the seven base units and 22 SI units with special names can be constructed directly from the seven defining constants. In fact, the units of the seven defining constants include both base and derived units.

The CGPM has adopted a series of prefixes for use in forming the decimal multiples and sub-multiples of the coherent SI units (see chapter 3). They are convenient for expressing the values of quantities that are much larger than or much smaller than the coherent unit. However, when prefixes are used with SI units, the resulting units are no longer coherent, because the prefix introduces a numerical factor other than one. Prefixes may be used with any of the 29 SI units with special names with the exception of the base unit kilogram, which is further explained in chapter 3.

**Table 4. The 22 SI units with special names and symbols**

Derived quantity	Special name of unit	Unit expressed in terms of base units <sup>(a)</sup>	Unit expressed in terms of other SI units
plane angle	radian <sup>(b)</sup>	$\text{rad} = \text{m}/\text{m}$	
solid angle	steradian <sup>(c)</sup>	$\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2$	
frequency	hertz <sup>(d)</sup>	$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$	
force	newton	$\text{N} = \text{kg m s}^{-2}$	
pressure, stress	pascal	$\text{Pa} = \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$	
energy, work, amount of heat	joule	$\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$	N m
power, radiant flux	watt	$\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$	J/s
electric charge	coulomb	$\text{C} = \text{A s}$	

electric potential difference <sup>(e)</sup>	volt	$V = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-1}$	W/A
capacitance	farad	$F = \text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^4 \text{A}^2$	C/V
electric resistance	ohm	$\Omega = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$	V/A
electric conductance	siemens	$S = \text{kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3 \text{A}^2$	A/V
magnetic flux	weber	$\text{Wb} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-1}$	V s
magnetic flux density	tesla	$T = \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$	Wb/m <sup>2</sup>
inductance	henry	$H = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-2}$	Wb/A
Celsius temperature	degree Celsius <sup>(f)</sup>	$^{\circ}\text{C} = \text{K}$	
luminous flux	lumen	$\text{lm} = \text{cd sr}^{(g)}$	cd sr
illuminance	lux	$\text{lx} = \text{cd sr m}^{-2}$	lm/m <sup>2</sup>
activity referred to a radionuclide <sup>(d, h)</sup>	becquerel	$\text{Bq} = \text{s}^{-1}$	
absorbed dose, kerma	gray	$\text{Gy} = \text{m}^2 \text{s}^{-2}$	J/kg
dose equivalent	sievert <sup>(i)</sup>	$\text{Sv} = \text{m}^2 \text{s}^{-2}$	J/kg
catalytic activity	katal	$\text{kat} = \text{mol s}^{-1}$	

- (a) The order of symbols for base units in this Table is different from that in the 8th edition following a decision by the CCU at its 21st meeting (2013) to return to the original order in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960) in which newton was written  $\text{kg m s}^{-2}$ , the joule as  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$  and J s as  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ . The intention was to reflect the underlying physics of the corresponding quantity equations although for some more complex derived units this may not be possible.
- (b) The radian is the coherent unit for plane angle. One radian is the angle subtended at the centre of a circle by an arc that is equal in length to the radius. It is also the unit for phase angle. For periodic phenomena, the phase angle increases by  $2\pi$  rad in one period. The radian was formerly an SI supplementary unit, but this category was abolished in 1995.
- (c) The steradian is the coherent unit for solid angle. One steradian is the solid angle subtended at the centre of a sphere by an area of the surface that is equal to the squared radius. Like the radian, the steradian was formerly an SI supplementary unit.
- (d) The hertz shall only be used for periodic phenomena and the becquerel shall only be used for stochastic processes in activity referred to a radionuclide.
- (e) Electric potential difference is also called “voltage” in many countries, as well as “electric tension” or simply “tension” in some countries.
- (f) The degree Celsius is used to express Celsius temperatures. The numerical value of a temperature difference or temperature interval is the same when expressed in either degrees Celsius or in kelvin.
- (g) In photometry the name steradian and the symbol sr are usually retained in expressions for units.
- (h) Activity referred to a radionuclide is sometimes incorrectly called radioactivity.
- (i) See CIPM Recommendation 2 on the use of the sievert (PV, 2002, **70**, 205).

The seven base units and 22 units with special names and symbols may be used in combination to express the units of other derived quantities. Since the number of quantities is without limit, it is not possible to provide a complete list of derived quantities and derived units. Table 5 lists some examples of derived quantities and the corresponding coherent derived units expressed in terms of base units. In addition, Table 6 lists examples of coherent derived units whose names and symbols also include derived units. The complete set of SI units includes both the coherent set and the multiples and sub-multiples formed by using the SI prefixes.

**Table 5. Examples of coherent derived units in the SI expressed in terms of base units**

Derived quantity	Typical symbol of quantity	Derived unit expressed in terms of base units
area	$A$	$\text{m}^2$
volume	$V$	$\text{m}^3$
speed, velocity	$v$	$\text{m s}^{-1}$
acceleration	$a$	$\text{m s}^{-2}$
wavenumber	$\sigma$	$\text{m}^{-1}$
density, mass density	$\rho$	$\text{kg m}^{-3}$
surface density	$\rho_A$	$\text{kg m}^{-2}$
specific volume	$v$	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
current density	$j$	$\text{A m}^{-2}$
magnetic field strength	$H$	$\text{A m}^{-1}$
amount of substance concentration	$c$	$\text{mol m}^{-3}$
mass concentration	$\rho, \gamma$	$\text{kg m}^{-3}$
luminance	$L_v$	$\text{cd m}^{-2}$

**Table 6. Examples of SI coherent derived units whose names and symbols include SI coherent derived units with special names and symbols**

Derived quantity	Name of coherent derived unit	Symbol	Derived unit expressed in terms of base units
dynamic viscosity	pascal second	$\text{Pa s}$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
moment of force	newton metre	$\text{N m}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
surface tension	newton per metre	$\text{N m}^{-1}$	$\text{kg s}^{-2}$
angular velocity, angular frequency	radian per second	$\text{rad s}^{-1}$	$\text{s}^{-1}$
angular acceleration	radian per second squared	$\text{rad s}^{-2}$	$\text{s}^{-2}$
heat flux density, irradiance	watt per square metre	$\text{W m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-3}$
heat capacity, entropy	joule per kelvin	$\text{J K}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
specific heat capacity, specific entropy	joule per kilogram kelvin	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$
specific energy	joule per kilogram	$\text{J kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
thermal conductivity	watt per metre kelvin	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{K}^{-1}$
energy density	joule per cubic metre	$\text{J m}^{-3}$	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
electric field strength	volt per metre	$\text{V m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-3} \text{A}^{-1}$
electric charge density	coulomb per cubic metre	$\text{C m}^{-3}$	$\text{A s m}^{-3}$
surface charge density	coulomb per square metre	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
electric flux density, electric displacement	coulomb per square metre	$\text{C m}^{-2}$	$\text{A s m}^{-2}$
permittivity	farad per metre	$\text{F m}^{-1}$	$\text{kg}^{-1} \text{m}^{-3} \text{s}^4 \text{A}^2$
permeability	henry per metre	$\text{H m}^{-1}$	$\text{kg m s}^{-2} \text{A}^{-2}$
molar energy	joule per mole	$\text{J mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1}$

molar entropy, molar heat capacity	joule per mole kelvin	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
exposure (x- and $\gamma$ -rays)	coulomb per kilogram	$\text{C kg}^{-1}$	$\text{A s kg}^{-1}$
absorbed dose rate	gray per second	$\text{Gy s}^{-1}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
radiant intensity	watt per steradian	$\text{W sr}^{-1}$	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
radiance	watt per square metre steradian	$\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$	$\text{kg s}^{-3}$
catalytic activity concentration	katal per cubic metre	$\text{kat m}^{-3}$	$\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-3}$

It is important to emphasize that each physical quantity has only one coherent SI unit, even though this unit can be expressed in different forms by using some of the special names and symbols.

The converse, however, is not true, because in general several different quantities may share the same SI unit. For example, for the quantity heat capacity as well as for the quantity entropy the SI unit is joule per kelvin. Similarly, for the base quantity electric current as well as the derived quantity magnetomotive force the SI unit is the ampere. It is therefore important not to use the unit alone to specify the quantity. This applies not only to technical texts, but also, for example, to measuring instruments (i.e. the instrument read-out needs to indicate both the unit and the quantity measured).

In practice, with certain quantities, preference is given to the use of certain special unit names to facilitate the distinction between different quantities having the same dimension. When using this freedom, one may recall the process by which this quantity is defined. For example, the quantity torque is the cross product of a position vector and a force vector. The SI unit is newton metre. Even though torque has the same dimension as energy (SI unit joule), the joule is never used for expressing torque.

The SI unit of frequency is hertz, the SI unit of angular velocity and angular frequency is radian per second, and the SI unit of activity is becquerel, implying counts per second. Although it is formally correct to write all three of these units as the reciprocal second, the use of the different names emphasizes the different nature of the quantities concerned. It is especially important to carefully distinguish frequencies from angular frequencies, because by definition their numerical values differ by a factor<sup>1</sup> of  $2\pi$ . Ignoring this fact may cause an error of  $2\pi$ . Note that in some countries, frequency values are conventionally expressed using “cycle/s” or “cps” instead of the SI unit Hz, although “cycle” and “cps” are not units in the SI. Note also that it is common, although not recommended, to use the term frequency for quantities expressed in rad/s. Because of this, it is recommended that quantities called “frequency”, “angular frequency”, and “angular velocity” always be given explicit units of Hz or rad/s and not  $\text{s}^{-1}$ .

In the field of ionizing radiation, the SI unit becquerel rather than the reciprocal second is used. The SI units gray and sievert are used for absorbed dose and dose equivalent, respectively, rather than joule per kilogram. The special names becquerel, gray and sievert were specifically introduced because of the dangers to human health that might arise from mistakes involving the units reciprocal second and joule per kilogram, in case the latter units were incorrectly taken to identify the different quantities involved.

The International Electrotechnical Commission (IEC) has introduced the var (symbol: var) as a special name for the unit of reactive power. In terms of SI coherent units, the var is identical to the volt ampere.

<sup>1</sup> see ISO 80000-3 for details

Special care must be taken when expressing temperatures or temperature differences, respectively. A temperature difference of 1 K equals that of 1 °C, but for an absolute temperature the difference of 273.15 K must be taken into account. The unit degree Celsius is only coherent when expressing temperature differences.

### 2.3.5 Units for quantities that describe biological and physiological effects

Four of the SI units listed in tables 2 and 4 include physiological weighting factors: candela, lumen, lux and sievert.

Lumen and lux are derived from the base unit candela. Like the candela, they carry information about human vision. The candela was established as a base unit in 1954, acknowledging the importance of light in daily life. Further information on the units and conventions used for defining photochemical and photobiological quantities is in Appendix 3.

Ionizing radiation deposits energy in irradiated matter. The ratio of deposited energy to mass is termed absorbed dose  $D$ . As decided by the CIPM in 2002, the quantity dose equivalent  $H = Q D$  is the product of the absorbed dose  $D$  and a numerical quality factor  $Q$  that takes into account the biological effectiveness of the radiation and is dependent on the energy and type of radiation.

There are units for quantities that describe biological effects and involve weighting factors, which are not SI units. Two examples are given here:

Sound causes pressure fluctuations in the air, superimposed on the normal atmospheric pressure, that are sensed by the human ear. The sensitivity of the ear depends on the frequency of the sound, but it is not a simple function of either the pressure changes or the frequency. Therefore, frequency-weighted quantities are used in acoustics to approximate the way in which sound is perceived. They are used, for example, for measurements concerning protection against hearing damage. The effect of ultrasonic acoustic waves poses similar concerns in medical diagnosis and therapy.

There is a class of units for quantifying the biological activity of certain substances used in medical diagnosis and therapy that cannot yet be defined in terms of the units of the SI. This lack of definition is because the mechanism of the specific biological effect of these substances is not yet sufficiently well understood for it to be quantifiable in terms of physico-chemical parameters. In view of their importance for human health and safety, the World Health Organization (WHO) has taken responsibility for defining WHO International Units (IU) for the biological activity of such substances.

### 2.3.6 SI units in the framework of the general theory of relativity

The practical realization of a unit and the process of comparison require a set of equations within a framework of a theoretical description. In some cases, these equations include relativistic effects.

For frequency standards it is possible to establish comparisons at a distance by means of electromagnetic signals. To interpret the results, the general theory of relativity is required, since it predicts, among other things, a relative frequency shift between standards of about 1 part in  $10^{16}$  per metre of altitude difference at the surface of the earth. Effects of this magnitude must be corrected for when comparing the best frequency standards.

When practical realizations are compared locally, i.e. in a small space-time domain, effects due to the space-time curvature described by the general theory of relativity can be neglected. When realizations share the same space-time coordinates (for example the same motion and acceleration or gravitational field), relativistic effects may be neglected entirely.



### 3 Decimal multiples and sub-multiples of SI units

Decimal multiples and submultiples ranging from  $10^{24}$  to  $10^{-24}$  are provided for use with the SI units. The names and symbols of these multiple and sub-multiple prefixes are presented in Table 7.

Prefix symbols are printed in upright typeface, as are unit symbols, regardless of the typeface used in the surrounding text and are attached to unit symbols without a space between the prefix symbol and the unit symbol. With the exception of da (deca), h (hecto) and k (kilo), all multiple prefix symbols are upper-case letters and all sub-multiple prefix symbols are lowercase letters. All prefix names are printed in lowercase letters, except at the beginning of a sentence.

The SI prefixes refer strictly to powers of 10. They should not be used to indicate powers of 2 (for example, one kilobit represents 1000 bits and not 1024 bits). The names and symbols for prefixes to be used with powers of 2 are recommended as follows:

kibi	Ki	$2^{10}$
mebi	Mi	$2^{20}$
gibi	Gi	$2^{30}$
tebi	Ti	$2^{40}$
pebi	Pi	$2^{50}$
exbi	Ei	$2^{60}$
zebi	Zi	$2^{70}$
yobi	Yi	$2^{80}$

**Table 7. SI prefixes**

Factor	Name	Symbol	Factor	Name	Symbol
$10^1$	deca	da	$10^{-1}$	deci	d
$10^2$	hecto	h	$10^{-2}$	centi	c
$10^3$	kilo	k	$10^{-3}$	milli	m
$10^6$	mega	M	$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^9$	giga	G	$10^{-9}$	nano	n
$10^{12}$	tera	T	$10^{-12}$	pico	p
$10^{15}$	peta	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

The grouping formed by a prefix symbol attached to a unit symbol constitutes a new inseparable unit symbol (forming a multiple or sub-multiple of the unit concerned) that can be raised to a positive or negative power and that can be combined with other unit symbols to form compound unit symbols.

*Examples:* pm (picometre), mmol (millimole),  $G\Omega$  (gigaohm), THz (terahertz)

$$2.3 \text{ cm}^3 = 2.3 (\text{cm})^3 = 2.3 (10^{-2} \text{ m})^3 = 2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

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

Similarly prefix names are also inseparable from the unit names to which they are attached. Thus, for example, millimetre, micropascal and meganewton are single words.

Compound prefix symbols, i.e. prefix symbols formed by the juxtaposition of two or more prefix symbols, are not permitted. This rule also applies to two or more compound prefix names.

Prefix symbols can neither stand alone nor be attached to the number 1, the symbol for the unit one. Similarly, prefix names cannot be attached to the name of the unit one, that is, to the word “one”.

The kilogram is the only coherent SI unit, whose name and symbol, for historical reasons, include a prefix. Names and symbols for decimal multiples and sub-multiples of the unit of mass are formed by attaching prefix names and symbols to the unit name “gram” and the unit symbol “g” respectively. For example,  $10^{-6}$  kg is written as milligram, mg, not as microkilogram,  $\mu$ kg.

## 4 Non-SI units that are accepted for use with the SI

The SI provides the internationally agreed reference in terms of which all other units are defined. The coherent SI units have the important advantage that unit conversions are not required when inserting particular values for quantities into quantity equations.

Nonetheless it is recognized that some non-SI units are widely used and are expected to continue to be used for many years. Therefore, the CIPM has accepted some non-SI units for use with the SI; these are listed in Table 8. If these units are used it should be understood that some advantages of the SI are lost. The SI prefixes can be used with several of these units, but not, for example, with the non-SI units of time.

**Table 8. Non-SI units accepted for use with the SI Units**

Quantity	Name of unit	Symbol for unit	Value in SI units
time	minute	min	1 min = 60 s
	hour	h	1 h = 60 min = 3600 s
	day	d	1 d = 24 h = 86 400 s
length	astronomical unit <sup>(a)</sup>	au	1 au = 149 597 870 700 m
plane and phase angle	degree	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad
	minute	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\,800$ ) rad
	second <sup>(b)</sup>	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\,000$ ) rad
area	hectare <sup>(c)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
volume	litre <sup>(d)</sup>	l, L	1 l = 1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
mass	tonne <sup>(e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
	dalton <sup>(f)</sup>	Da	1 Da = 1.660 539 066 60(50) × 10 <sup>-27</sup> kg
energy	electronvolt <sup>(g)</sup>	eV	1 eV = 1.602 176 634 × 10 <sup>-19</sup> J
logarithmic ratio quantities	neper <sup>(h)</sup>	Np	see text
	bel <sup>(h)</sup>	B	
	decibel <sup>(h)</sup>	dB	

The gal (symbol: Gal) is a non SI unit of acceleration employed in geodesy and geophysics to express acceleration due to gravity

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$$

(a) As decided at the XXVIII General Assembly of the International Astronomical Union (Resolution B2, 2012).

(b) For some applications such as in astronomy, small angles are measured in arcseconds (i.e. seconds of plane angle), denoted as or ", milliarcseconds, microarcseconds and picoarcseconds, denoted mas,  $\mu$ as and pas, respectively, where arcsecond is an alternative name for second of plane angle.

(c) The unit hectare and its symbol ha, were adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41). The hectare is used to express land area.

(d) The litre and the symbol lower-case l, were adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41). The alternative symbol, capital L, was adopted by the 16th CGPM (1979, Resolution 6; CR, 101 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57) in order to avoid the risk of confusion between the letter l (el) and the numeral 1 (one).

(e) The tonne and its symbol t, were adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41). This unit is sometimes referred to as "metric ton" in some English-speaking countries.

- (f) The dalton (Da) and the unified atomic mass unit (u) are alternative names (and symbols) for the same unit, equal to  $1/12$  of the mass of a free carbon 12 atom, at rest and in its ground state. This value of the dalton is the value recommended in the CODATA 2018 adjustment.
- (g) The electronvolt is the kinetic energy acquired by an electron in passing through a potential difference of one volt in vacuum. The electronvolt is often combined with the SI prefixes.
- (h) In using these units it is important that the nature of the quantity be specified and that any reference value used be specified.

---

Table 8 also includes the units of logarithmic ratio quantities, the neper, bel and decibel. They are used to convey information on the nature of the logarithmic ratio quantity concerned. The neper, Np, is used to express the values of quantities whose numerical values are based on the use of the neperian (or natural) logarithm,  $\ln = \log_e$ . The bel and the decibel, B and dB, where  $1 \text{ dB} = (1/10) \text{ B}$ , are used to express the values of logarithmic ratio quantities whose numerical values are based on the decadic logarithm,  $\lg = \log_{10}$ . The statement  $L_X = m \text{ dB} = (m/10) \text{ B}$  (where  $m$  is a number) is interpreted to mean that  $m = 10 \lg(X/X_0)$ . The units neper, bel and decibel have been accepted by the CIPM for use with the International System, but are not SI units.

There are many more non-SI units, which are either of historical interest, or are still used in specific fields (for example, the barrel of oil) or in particular countries (the inch, foot and yard). The CIPM can see no case for continuing to use these units in modern scientific and technical work. However, it is clearly a matter of importance to be able to recall the relation of these units to the corresponding SI units and this will continue to be true for many years.

## 5 Writing unit symbols and names, and expressing the values of quantities

### 5.1 The use of unit symbols and names

General principles for the writing of unit symbols and numbers were first given by the 9th CGPM (1948, Resolution 7). These were subsequently elaborated by ISO, IEC and other international bodies. As a consequence, there now exists a general consensus on how unit symbols and names, including prefix symbols and names as well as quantity symbols should be written and used, and how the values of quantities should be expressed. Compliance with these rules and style conventions, the most important of which are presented in this chapter, supports the readability and unambiguity of numerical results expressed in SI units.

### 5.2 Unit symbols

Unit symbols are printed in upright type regardless of the type used in the surrounding text. They are printed in lower-case letters unless they are derived from a proper name, in which case the first letter is a capital letter.

An exception, adopted by the 16th CGPM (1979, Resolution 6), is that either capital L or lower-case l is allowed for the litre, in order to avoid possible confusion between the numeral 1 (one) and the lower-case letter l (el).

A multiple or sub-multiple prefix, if used, is part of the unit and precedes the unit symbol without a separator. A prefix is never used in isolation and compound prefixes are never used.

Unit symbols are mathematical entities and not abbreviations. Therefore, they are not followed by a period except at the end of a sentence, and one must neither use the plural nor mix unit symbols and unit names within one expression, since names are not mathematical entities.

In forming products and quotients of unit symbols the normal rules of algebraic multiplication or division apply. Multiplication must be indicated by a space or a half-high (centred) dot ( $\cdot$ ), since otherwise some prefixes could be misinterpreted as a unit symbol. Division is indicated by a horizontal line, by a solidus (oblique stroke,  $/$ ) or by negative exponents. When several unit symbols are combined, care should be taken to avoid ambiguities, for example by using brackets or negative exponents. A solidus must not be used more than once in a given expression without brackets to remove ambiguities.

It is not permissible to use abbreviations for unit symbols or unit names, such as sec (for either s or second), sq. mm (for either  $\text{mm}^2$  or square millimetre), cc (for either  $\text{cm}^3$  or cubic centimetre), or mps (for either m/s or metre per second). The use of the correct symbols for SI units, and for units in general, as listed in earlier chapters of this brochure, is mandatory. In this way ambiguities and misunderstandings in the values of quantities are avoided.

## 5.3 Unit names

Unit names are normally printed in upright type and they are treated like ordinary nouns. In English, the names of units start with a lower-case letter (even when the symbol for the unit begins with a capital letter), except at the beginning of a sentence or in capitalized material such as a title. In keeping with this rule, the correct spelling of the name of the unit with the symbol °C is “degree Celsius” (the unit degree begins with a lower-case d and the modifier Celsius begins with an upper-case C because it is a proper name).

Although the values of quantities are normally expressed using symbols for numbers and symbols for units, if for some reason the unit name is more appropriate than the unit symbol, the unit name should be spelled out in full.

When the name of a unit is combined with the name of a multiple or sub-multiple prefix, no space or hyphen is used between the prefix name and the unit name. The combination of prefix name and unit name is a single word (see chapter 3).

When the name of a derived unit is formed from the names of individual units by juxtaposition, either a space or a hyphen is used to separate the names of the individual units.

## 5.4 Rules and style conventions for expressing values of quantities

### 5.4.1 Value and numerical value of a quantity, and the use of quantity calculus

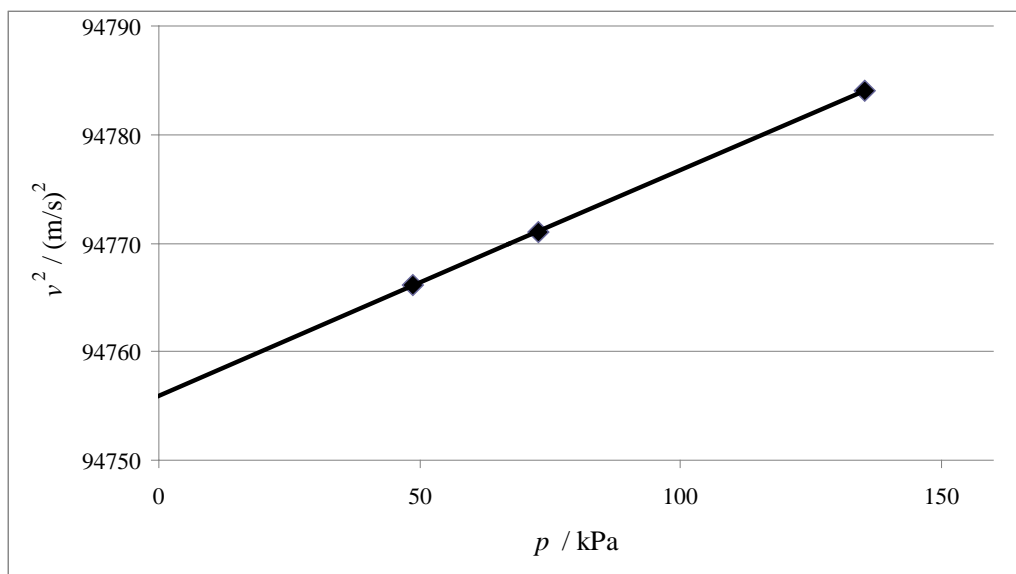
Symbols for quantities are generally single letters set in an italic font, although they may be qualified by further information in subscripts or superscripts or in brackets. For example,  $C$  is the recommended symbol for heat capacity,  $c_m$  for molar heat capacity,  $c_{m,p}$  for molar heat capacity at constant pressure, and  $c_{m,V}$  for molar heat capacity at constant volume.

Recommended names and symbols for quantities are listed in many standard references, such as the ISO/IEC 80000 series *Quantities and units*, the IUPAP SUNAMCO Red Book *Symbols, Units and Nomenclature in Physics* and the IUPAC Green Book *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*. However, symbols for quantities are recommendations (in contrast to symbols for units, for which the use of the correct form is mandatory). In certain circumstances authors may wish to use a symbol of their own choice for a quantity, for example to avoid a conflict arising from the use of the same symbol for two different quantities. In such cases, the meaning of the symbol must be clearly stated. However, neither the name of a quantity, nor the symbol used to denote it, should imply any particular choice of unit.

Symbols for units are treated as mathematical entities. In expressing the value of a quantity as the product of a numerical value and a unit, both the numerical value and the unit may be treated by the ordinary rules of algebra. This procedure is described as the use of quantity calculus, or the algebra of quantities. For example, the equation  $p = 48 \text{ kPa}$  may equally be written as  $p/\text{kPa} = 48$ . It is common practice to write the quotient of a quantity and a unit in this way for a column heading in a table, so that the entries in the table are simply numbers. For example, a table of the velocity squared versus pressure may be formatted as shown below.

$p/\text{kPa}$	$v^2/(\text{m/s})^2$
48.73	94766
72.87	94771
135.42	94784

The axes of a graph may also be labelled in this way, so that the tick marks are labelled only with numbers, as in the graph below.



#### 5.4.2 Quantity symbols and unit symbols

Unit symbols must not be used to provide specific information about the quantity and should never be the sole source of information on the quantity. Units are never qualified by further information about the nature of the quantity; any extra information on the nature of the quantity should be attached to the quantity symbol and not to the unit symbol.

For example:

The maximum electric potential difference is  $U_{\text{max}} = 1000 \text{ V}$

but not  $U = 1000 \text{ V}_{\text{max}}$ .

The mass fraction of copper in the sample of silicon is

$w(\text{Cu}) = 1.3 \times 10^{-6}$

but not  $1.3 \times 10^{-6} \text{ w/w}$ .

#### 5.4.3 Formatting the value of a quantity

The numerical value always precedes the unit and a space is always used to separate the unit from the number. Thus the value of the quantity is the product of the number and the unit. The space between the number and the unit is regarded as a multiplication sign (just as a space between units implies multiplication). The only exceptions to this rule are for the unit symbols for degree, minute and second for plane angle,  $^{\circ}$ ,  $'$  and  $''$ , respectively, for which no space is left between the numerical value and the unit symbol.

$m = 12.3 \text{ g}$  where  $m$  is used as a symbol for the quantity mass, but  $\varphi = 30^{\circ} 22' 8''$ , where  $\varphi$  is used as a symbol for the quantity plane angle.

This rule means that the symbol  $^{\circ}\text{C}$  for the degree Celsius is preceded by a space when one expresses values of Celsius temperature  $t$ .

$t = 30.2^{\circ}\text{C}$   
but not  $t = 30.2^{\circ}\text{C}$   
nor  $t = 30.2^{\circ} \text{C}$

Even when the value of a quantity is used as an adjective, a space is left between the numerical value and the unit symbol. Only when the name of the unit is spelled out would the ordinary rules of grammar apply, so that in English a hyphen would be used to separate the number from the unit.

a  $10 \text{ k}\Omega$  resistor  
a 35-millimetre film

In any expression, only one unit is used. An exception to this rule is in expressing the values of time and of plane angles using non-SI units. However, for plane angles it is generally preferable to divide the degree decimally. It is therefore preferable to write  $22.20^{\circ}$  rather than  $22^{\circ} 12'$ , except in fields such as navigation, cartography, astronomy, and in the measurement of very small angles.

$l = 10.234 \text{ m}$   
but not  
 $l = 10 \text{ m } 23.4 \text{ cm}$

#### 5.4.4 Formatting numbers, and the decimal marker

The symbol used to separate the integral part of a number from its decimal part is called the decimal marker. Following a decision by the 22nd CGPM (2003, Resolution 10), the decimal marker “shall be either the point on the line or the comma on the line.” The decimal marker chosen should be that which is customary in the language and context concerned.

If the number is between +1 and −1, then the decimal marker is always preceded by a zero.

−0.234 but not −.234

Following the 9th CGPM (1948, Resolution 7) and the 22nd CGPM (2003, Resolution 10), for numbers with many digits the digits may be divided into groups of three by a space, in order to facilitate reading. Neither dots nor commas are inserted in the spaces between groups of three. However, when there are only four digits before or after the decimal marker, it is customary not to use a space to isolate a single digit. The practice of grouping digits in this way is a matter of choice; it is not always followed in certain specialized applications such as engineering drawings, financial statements and scripts to be read by a computer.

43 279.168 29  
but not 43,279.168,29

either 3279.1683  
or 3 279.168 3

For numbers in a table, the format used should not vary within one column.

#### 5.4.5 Expressing the measurement uncertainty in the value of a quantity

The uncertainty associated with an estimated value of a quantity should be evaluated and expressed in accordance with the document JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections), *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. The standard uncertainty associated with a quantity  $x$  is denoted by  $u(x)$ . One convenient way to represent the standard uncertainty is given in the following example:

$$m_n = 1.674\,927\,471\,(21) \times 10^{-27} \text{ kg},$$

where  $m_n$  is the symbol for the quantity (in this case the mass of a neutron) and the number in parentheses is the numerical value of the standard uncertainty of the estimated value of  $m_n$  referred to the last digits of the quoted value; in this case  $u(m_n) = 0.000\,000\,021 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . If an expanded uncertainty  $U(x)$  is used in place of the standard uncertainty  $u(x)$ , then the coverage probability  $p$  and the coverage factor  $k$  must be stated.

#### 5.4.6 Multiplying or dividing quantity symbols, the values of quantities, or numbers

When multiplying or dividing quantity symbols any of the following methods may be used:

$$ab, a\,b, a \cdot b, a \times b, a/b, \frac{a}{b}, a\,b^{-1}.$$

When multiplying the value of quantities either a multiplication sign  $\times$  or brackets should be used, not a half-high (centred) dot. When multiplying numbers only the multiplication sign  $\times$  should be used.

When dividing the values of quantities using a solidus, brackets are used to avoid ambiguity.

Examples:

$F = ma$  for force  
equals mass times  
acceleration

$(53 \text{ m/s}) \times 10.2 \text{ s}$   
or  $(53 \text{ m/s})(10.2 \text{ s})$

$25 \times 60.5$   
but not  $25 \cdot 60.5$

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

$(a/b)/c$ , not  $a/b/c$



### 5.4.7 Stating quantity values being pure numbers

As discussed in Section 2.3.3, values of quantities with unit one, are expressed simply as numbers. The unit symbol 1 or unit name “one” are not explicitly shown. SI prefix symbols can neither be attached to the symbol 1 nor to the name “one”, therefore powers of 10 are used to express particularly large or small values.

Quantities that are ratios of quantities of the same kind (for example length ratios and amount fractions) have the option of being expressed with units (m/m, mol/mol) to aid the understanding of the quantity being expressed and also allow the use of SI prefixes, if this is desirable ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\text{nmol}/\text{mol}$ ). Quantities relating to counting do not have this option, they are just numbers.

The internationally recognized symbol % (percent) may be used with the SI. When it is used, a space separates the number and the symbol %. The symbol % should be used rather than the name “percent”. In written text, however, the symbol % generally takes the meaning of “parts per hundred”. Phrases such as “percentage by mass”, “percentage by volume”, or “percentage by amount of substance” shall not be used; the extra information on the quantity should instead be conveyed in the description and symbol for the quantity.

The term “ppm”, meaning  $10^{-6}$  relative value, or 1 part in  $10^6$ , or parts per million, is also used. This is analogous to the meaning of percent as parts per hundred. The terms “parts per billion” and “parts per trillion” and their respective abbreviations “ppb” and “ppt”, are also used, but their meanings are language dependent. For this reason the abbreviations ppb and ppt should be avoided.

$n = 1.51$ ,  
but not  $n = 1.51 \times 1$ ,  
where  $n$  is the  
quantity symbol for  
refractive index.

In English-speaking countries, a billion is now generally taken to be  $10^9$  and a trillion to be  $10^{12}$ ; however, a billion may still sometimes be interpreted as  $10^{12}$  and a trillion as  $10^{18}$ . The abbreviation ppt is also sometimes read as parts per thousand, adding further confusion.

### 5.4.8 Plane angles, solid angles and phase angles

The coherent SI unit for the plane angle and the phase angle is radian, unit symbol rad and that for the solid angle is steradian, unit symbol sr.

The plane angle, expressed in radian, between two lines originating from a common point is the length of circular arc  $s$ , swept out between the lines by a radius vector of length  $r$  from the common point divided by the length of the radius vector,  $\theta = s/r$  rad. The phase angle (often just referred to as the “phase”) is the argument of any complex number. It is the angle between the positive real axis and the radius of the polar representation of the complex number in the complex plane.

One radian corresponds to the angle for which  $s = r$ , thus  $1 \text{ rad} = 1$ . The measure of the right angle is exactly equal to the number  $\pi/2$ .

A historical convention is the degree. The conversion between radians and degrees follows from the relation  $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$ . Note that the degree, with the symbol  $^\circ$ , is not a unit of the SI.

The solid angle, expressed in steradian, corresponds to the ratio between an area  $A$  of the surface of a sphere of radius  $r$  and the squared radius,  $\Omega = A/r^2$  sr. One steradian corresponds to the solid angle for which  $A = r^2$ , thus  $1 \text{ sr} = 1$ .

The units rad and sr correspond to ratios of two lengths and two squared lengths, respectively. However, it shall be emphasized that rad and sr must only be used to express angles and solid angles, but not to express ratios of lengths and squared lengths in general.

When the SI was adopted by the 11th CGPM in 1960, a category of “supplementary units” was created to accommodate the radian and steradian. Decades later, The CGPM decided:  
(1) “to interpret the supplementary units in the SI, namely the radian and the steradian, as dimensionless derived units, the names and symbols of which may, but need not, be used in expressions for other SI derived units, as is convenient”, and  
(2) to eliminate the separate class of supplementary units (Resolution 8 of the 20th CGPM (1995)).

## Appendix 1. Decisions of the CGPM and the CIPM

This appendix lists those decisions of the CGPM and the CIPM that bear directly upon definitions of the units of the SI, prefixes defined for use as part of the SI, and conventions for the writing of unit symbols and numbers. It is not a complete list of CGPM and CIPM decisions. For a complete list, reference must be made to successive volumes of the *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* (CR) and *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures* (PV) or, for recent decisions, to *Metrologia*.

Since the SI is not a static convention, but evolves following developments in the science of measurement, some decisions have been abrogated or modified; others have been clarified by additions. Decisions that have been subject to such changes are identified by an asterisk (\*) and are linked by a note to the modifying decision.

The original text of each decision (or its translation) is shown in a different font (sans serif) of normal weight to distinguish it from the main text. The asterisks and notes were added by the BIPM to make the text more understandable. They do not form part of the original text.

The decisions of the CGPM and CIPM are listed in this appendix in strict chronological order, from 1889 to 2018, in order to preserve the continuity with which they were taken. However in order to make it easy to locate decisions related to particular topics a table of contents is included below, ordered by subject, with page references to the particular meetings at which decisions relating to each subject were taken.

## Table of Contents of Appendix 1

<b>Decisions relating to the establishment of the SI</b>		<b>page</b>
9th CGPM, 1948:	decision to establish the SI	<b>161</b>
10th CGPM, 1954:	decision on the first six base units	<b>163</b>
CIPM 1956:	decision to adopt the name “Système International d’Unités”	<b>164</b>
11th CGPM, 1960:	confirms the name and the abbreviation “SI”, names prefixes from tera to pico, establishes the supplementary units rad and sr, lists some derived units	<b>165</b>
CIPM, 1969:	declarations concerning base, supplementary, derived and coherent units, and the use of prefixes	<b>170</b>
CIPM, 2001:	“SI units” and “units of the SI”	<b>180</b>
23rd CGPM, 2007:	possible redefinition of certain base units of the International System of Units, the SI	<b>188</b>
24th CGPM, 2011:	possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
25th CGPM, 2014:	future revision of the International System of Units, the SI	<b>195</b>
26th CGPM, 2018:	revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Decisions relating to the base units of the SI</b>		
<b>Length</b>		
1st CGPM, 1889:	sanction of the prototype metre	<b>158</b>
7th CGPM, 1927:	definition and use of the prototype metre	<b>159</b>
10th CGPM, 1954:	metre adopted as a base unit	<b>163</b>
11th CGPM, 1960:	redefinition of the metre in terms of krypton 86 radiation	<b>164</b>
15th CGPM, 1975:	recommends value for the speed of light	<b>172</b>
17th CGPM, 1983:	redefinition of the metre using the speed of light, realization of the definition of the metre	<b>175</b>
CIPM, 2002:	specifies the rules for the practical realization of the definition of the metre	<b>181</b>
CIPM, 2003:	revision of the list of recommended radiations	<b>183</b>
CIPM, 2005:	revision of the list of recommended radiations	<b>185</b>
CIPM, 2007:	revision of the list of recommended radiations	<b>186</b>
23th CGPM, 2007:	revision of the <i>mise en pratique</i> of the definition of the metre and development of new optical frequency standards	<b>186</b>
CIPM, 2009:	updates to the list of standard frequencies	<b>189</b>
24th CGPM, 2011:	possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>

	<b>page</b>
24th CGPM, 2011: revision of the <i>mise en pratique</i> of the definition of the metre and development of new optical frequency standards	<b>193</b>
CIPM, 2013: updates to the list of standard frequencies	<b>193</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Mass</b>	
1st CGPM, 1889: sanction of the prototype kilogram	<b>158</b>
3rd CGPM, 1901: declaration on distinguishing mass and weight, and on the conventional value of $g_n$	<b>159</b>
10th CGPM, 1954: kilogram adopted as a base unit	<b>163</b>
CIPM, 1967: declaration on applying prefixes to the gram	<b>168</b>
21st CGPM, 1999: future redefinition of the kilogram	<b>179</b>
23rd CGPM, 2007: possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)	<b>188</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
25th CGPM, 2014: future revision of the International System of Units, the SI	<b>195</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Time</b>	
10th CGPM, 1954: second adopted as a base unit	<b>163</b>
CIPM, 1956: definition of the second as a fraction of the tropical year 1900	<b>163</b>
11th CGPM, 1960: ratifies the CIPM 1956 definition of the second	<b>164</b>
CIPM, 1964: declares the caesium 133 hyperfine transition to be the recommended standard	<b>167</b>
12th CGPM, 1964: empowers CIPM to investigate atomic and molecular frequency standards	<b>167</b>
13th CGPM, 1967/68: defines the second in terms of the caesium transition	<b>168</b>
CCDS, 1970: defines International Atomic Time, TAI	<b>171</b>
14th CGPM, 1971: requests the CIPM to define and establish International Atomic Time, TAI	<b>171</b>
15th CGPM, 1975: endorses the use of Coordinated Universal Time, UTC	<b>172</b>
CIPM, 2006: secondary representations of the second	<b>185</b>
23rd CGPM, 2007: on the revision of the <i>mise en pratique</i> of the definition of the metre and the development of new optical frequency standards	<b>186</b>
CIPM, 2009: updates to the list of standard frequencies	<b>189</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
24th CGPM, 2011: revision of the <i>mise en pratique</i> of the metre and the development of new optical frequency standards	<b>193</b>

	<b>page</b>
CIPM, 2013: updates to the list of standard frequencies	<b>193</b>
CIPM, 2015: updates to the list of standard frequencies	<b>196</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Electrical units</b>	
CIPM, 1946: definitions of coherent electrical units in the metre-kilogram-second (MKS) system of units (to enter into force on 1 January 1948)	<b>160</b>
10th CGPM, 1954: ampere adopted as a base unit	<b>163</b>
14th CGPM, 1971: adopts the name siemens, symbol S, for electrical conductance	<b>171</b>
18th CGPM, 1987: forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm	<b>176</b>
CIPM, 1988: conventional value of the Josephson constant defined (to enter into force on 1 January 1990)	<b>177</b>
CIPM, 1988: conventional value of the von Klitzing constant defined (to enter into force on 1 January 1990)	<b>177</b>
23rd CGPM, 2007: possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)	<b>188</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
25th CGPM, 2014: future revision of the International System of Units, the SI	<b>195</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Thermodynamic temperature</b>	
9th CGPM, 1948: adopts the triple point of water as the thermodynamic reference point, adopts the zero of Celsius temperature to be 0.01 degree below the triple point	<b>160</b>
CIPM, 1948: adopts the name degree Celsius for the Celsius temperature scale	<b>161</b>
10th CGPM, 1954: defines thermodynamic temperature such that the triple point of water is 273.16 degrees Kelvin exactly, defines standard atmosphere	<b>162</b>
10th CGPM, 1954: degree Kelvin adopted as a base unit	<b>163</b>
13th CGPM, 1967/68: decides formal definition of the kelvin, symbol K	<b>169</b>
CIPM, 1989: the International Temperature Scale of 1990, ITS-90	<b>178</b>
CIPM, 2005: note added to the definition of the kelvin concerning the isotopic composition of water	<b>184</b>
23rd CGPM, 2007: clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature	<b>187</b>
23rd CGPM, 2007: possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)	<b>188</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>

	<b>page</b>
25th CGPM, 2014: future revision of the International System of Units, the SI	<b>195</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Amount of substance</b>	
14th CGPM, 1971: definition of the mole, symbol mol, as a seventh base unit, and rules for its use	<b>172</b>
21st CGPM, 1999: adopts the special name katal, kat	<b>180</b>
23rd CGPM, 2007: on the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI)	<b>188</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
25th CGPM, 2014: future revision of the International System of Units, the SI	<b>195</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Luminous intensity</b>	
CIPM, 1946: definition of photometric units, new candle and new lumen (to enter into force on 1 January 1948)	<b>159</b>
10th CGPM, 1954: candela adopted as a base unit	<b>163</b>
13th CGPM, 1967/68: defines the candela, symbol cd, in terms of a black body radiator	<b>169</b>
16th CGPM, 1979: redefines the candela in terms of monochromatic radiation	<b>173</b>
24th CGPM, 2011: possible future revision of the International System of Units, the SI	<b>189</b>
26th CGPM, 2018: revision of the International System of Units, the SI (to enter into force on 20 May 2019)	<b>197</b>
 <b>Decisions relating to SI derived and supplementary units</b>	
<b>SI derived units</b>	
12th CGPM, 1964: accepts the continued use of the curie as a non-SI unit	<b>168</b>
13th CGPM, 1967/68: lists some examples of derived units	<b>170</b>
15th CGPM, 1975: adopts the special names becquerel, Bq, and gray, Gy	<b>172</b>
16th CGPM, 1979: adopts the special name sievert, Sv	<b>174</b>
CIPM, 1984: decides to clarify the relationship between absorbed dose (SI unit gray) and dose equivalent (SI unit sievert)	<b>176</b>
CIPM, 2002: modifies the relationship between absorbed dose and dose equivalent	<b>182</b>
 <b>Supplementary units</b>	
CIPM, 1980: decides to interpret supplementary units as dimensionless derived units	<b>174</b>
20th CGPM, 1995: decides to abrogate the class of supplementary units, and confirms the CIPM interpretation that they are dimensionless derived units	<b>179</b>

<b>Decisions concerning terminology and the acceptance of units for use with the SI</b>	<b>page</b>
<b>SI prefixes</b>	
12th CGPM, 1964: decides to add femto and atto to the list of prefixes	<b>168</b>
15th CGPM, 1975: decides to add peta and exa to the list of prefixes	<b>173</b>
19th CGPM, 1991: decides to add zetta, zepto, yotta, and yocto to the list of prefixes	<b>179</b>
<b>Unit symbols and numbers</b>	
9th CGPM, 1948: decides rules for printing unit symbols	<b>162</b>
<b>Unit names</b>	
13th CGPM, 1967/68: abrogates the use of the micron and new candle as units accepted for use with the SI	<b>170</b>
<b>The decimal marker</b>	
22nd CGPM, 2003: decides to allow the use of the point or the comma on the line as the decimal marker	<b>183</b>
<b>Units accepted for use with the SI: an example, the litre</b>	
3rd CGPM, 1901: defines the litre as the volume of 1 kg of water	<b>158</b>
11th CGPM, 1960: requests the CIPM to report on the difference between the litre and the cubic decimetre	<b>166</b>
CIPM, 1961: recommends that volume be expressed in SI units and not in litres	<b>167</b>
12th CGPM, 1964: abrogates the former definition of the litre, recommends that litre may be used as a special name for the cubic decimetre	<b>167</b>
16th CGPM, 1979: decides, as an exception, to allow both l and L as symbols for the litre	<b>174</b>

**1st CGPM, 1889****■ Sanction of the international prototypes of the metre and the kilogram (CR, 34 - 38)\***

The Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the “Compte rendu of the President of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM)” and the “Report of the CIPM”, which show that, by the collaboration of the French section of the International Metre Commission and of the CIPM, the fundamental measurements of the international and national prototypes of the metre and of the kilogram have been made with all the accuracy and reliability which the present state of science permits;
- that the international and national prototypes of the metre and the kilogram are made of an alloy of platinum with 10 per cent iridium, to within 0.0001;
- the equality in length of the international Metre and the equality in mass of the international Kilogram with the length of the Metre and the mass of the Kilogram kept in the Archives of France;
- that the differences between the national Metres and the international Metre lie within 0.01 millimetre and that these differences are based on a hydrogen thermometer scale which can always be reproduced thanks to the stability of hydrogen, provided identical conditions are secured;
- that the differences between the national Kilograms and the international Kilogram lie within 1 milligram;
- that the international Metre and Kilogram and the national Metres and Kilograms fulfil the requirements of the Metre Convention,

**sanctions**

A. As regards international prototypes:

1. The Prototype of the metre chosen by the CIPM. This prototype, at the temperature of melting ice, shall henceforth represent the metric unit of length.
2. The Prototype of the kilogram adopted by the CIPM. This prototype shall henceforth be considered as the unit of mass.
3. The hydrogen thermometer centigrade scale in terms of which the equations of the prototype Metres have been established.

B. As regards national prototypes:

...

\* The definition of the metre was abrogated in 1960 by the 11th CGPM (Resolution 6, see p. 164).

**3rd CGPM, 1901****■ Declaration concerning the definition of the litre (CR, 38-39)\***

...

**The Conference declares**

1. The unit of volume, for high accuracy determinations, is the volume occupied by a mass of 1 kilogram of pure water, at its maximum density and at standard atmospheric pressure: this volume is called “litre”.
2. ...

\* This definition was abrogated in 1964 by the 12th CGPM (Resolution 6, see p. 167).



## ■ Declaration on the unit of mass and on the definition of weight; conventional value of $g_n$ (CR, 70)

**Taking into account** the decision of the Comité International des Poids et Mesures of 15 October 1887, according to which the kilogram has been defined as unit of mass;

**Taking into account** the decision contained in the sanction of the prototypes of the Metric System, unanimously accepted by the Conférence Générale des Poids et Mesures on 26 September 1889;

**Considering** the necessity to put an end to the ambiguity which in current practice still exists on the meaning of the word *weight*, used sometimes for *mass*, sometimes for *mechanical force*;

### The Conference declares

1. The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram;\*
2. The word “weight” denotes a quantity of the same nature as a “force”: the weight of a body is the product of its mass and the acceleration due to gravity; in particular, the standard weight of a body is the product of its mass and the standard acceleration due to gravity;
3. The value adopted in the International Service of Weights and Measures for the standard acceleration due to gravity is  $980.665 \text{ cm/s}^2$ , value already stated in the laws of some countries.\*\*

\* This definition was abrogated in 2018 by the 26th CGPM (Resolution 1, see p. 197).

\*\*This value of  $g_n$  was the conventional reference for calculating the now obsolete unit kilogram force.

## 7th CGPM, 1927

### ■ Definition of the metre by the international Prototype (CR, 49)\*

The unit of length is the metre, defined by the distance, at  $0^\circ$ , between the axes of the two central lines marked on the bar of platinum-iridium kept at the Bureau International des Poids et Mesures and declared Prototype of the metre by the 1st Conférence Générale des Poids et Mesures, this bar being subject to standard atmospheric pressure and supported on two cylinders of at least one centimetre diameter, symmetrically placed in the same horizontal plane at a distance of 571 mm from each other.

\* This definition was abrogated in 1960 by the 11th CGPM (Resolution 6, see p. 164).

## CIPM, 1946

### ■ Definitions of photometric units (PV, 20, 119-122)\*

#### Resolution

...

4. The photometric units may be defined as follows:

**New candle** (unit of luminous intensity). — The value of the new candle is such that the brightness of the full radiator at the temperature of solidification of platinum is 60 new candles per square centimetre.

**New lumen** (unit of luminous flux). — The new lumen is the luminous flux emitted in unit solid angle (steradian) by a uniform point source having a luminous intensity of 1 new candle.

5. ...

\* The two definitions contained in this Resolution were ratified in 1948 by the 9th CGPM, which also approved the name *candela* given to the “new candle” (CR, 54). For the lumen the qualifier “new” was later abandoned.

This definition was modified in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 5, see p. 169-170).

## ■ Definitions of electric units (PV, 20, 132-133)

### Resolution 2

...

4. (A) Definitions of the mechanical units which enter the definitions of electric units:

**Unit of force.** — The unit of force [in the MKS (metre, kilogram, second) system] is the force which gives to a mass of 1 kilogram an acceleration of 1 metre per second, per second.

**Joule** (unit of energy or work). — The joule is the work done when the point of application of 1 MKS unit of force [newton] moves a distance of 1 metre in the direction of the force.

**Watt** (unit of power). — The watt is the power which in one second gives rise to energy of 1 joule.

(B) Definitions of electric units. The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) accepts the following propositions which define the theoretical value of the electric units:

**Ampere** (unit of electric current). — The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to  $2 \times 10^{-7}$  MKS unit of force [newton] per metre of length.\*

**Volt** (unit of potential difference and of electromotive force). — The volt is the potential difference between two points of a conducting wire carrying a constant current of 1 ampere, when the power dissipated between these points is equal to 1 watt.

**Ohm** (unit of electric resistance). — The ohm is the electric resistance between two points of a conductor when a constant potential difference of 1 volt, applied to these points, produces in the conductor a current of 1 ampere, the conductor not being the seat of any electromotive force.

**Coulomb** (unit of quantity of electricity). — The coulomb is the quantity of electricity carried in 1 second by a current of 1 ampere.

**Farad** (unit of capacitance). — The farad is the capacitance of a capacitor between the plates of which there appears a potential difference of 1 volt when it is charged by a quantity of electricity of 1 coulomb.

**Henry** (unit of electric inductance). — The henry is the inductance of a closed circuit in which an electromotive force of 1 volt is produced when the electric current in the circuit varies uniformly at the rate of 1 ampere per second.

**Weber** (unit of magnetic flux). — The weber is the magnetic flux which, linking a circuit of one turn, would produce in it an electromotive force of 1 volt if it were reduced to zero at a uniform rate in 1 second.

The definitions contained in this Resolution were ratified in 1948 by the 9th CGPM (CR, 49), which also adopted the name newton (Resolution 7, see p. 162) for the MKS unit of force.

In 1954, the 10th CGPM (Resolution 6, see p. 163) established a practical system of units of measurement for international use. The ampere was designated as a base unit of this system.

\* This definition of the ampere was abrogated in 2018 by the 26th CGPM (Resolution 1, see p. 197).

## 9th CGPM, 1948

### ■ Triple point of water; thermodynamic scale with a single fixed point; unit of quantity of heat (joule) (CR, 55 and 63)

#### Resolution 3

1. With present-day techniques, the triple point of water is capable of providing a thermometric reference point with an accuracy higher than can be obtained from the melting point of ice.

In consequence the Comité Consultatif de Thermométrie et Calorimétrie (CCTC) considers that the zero of the centesimal thermodynamic scale must be defined as the temperature 0.0100 degree below that of the triple point of water.

2. The CCTC accepts the principle of an absolute thermodynamic scale with a single fundamental fixed point, at present provided by the triple point of pure water, the absolute temperature of which will be fixed at a later date.

The introduction of this new scale does not affect in any way the use of the International Scale, which remains the recommended practical scale.

3. The unit of quantity of heat is the joule.

The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

Note: It is requested that the results of calorimetric experiments be as far as possible expressed in joules. If the experiments are made by comparison with the rise of temperature of water (and that, for some reason, it is not possible to avoid using the calorie), the information necessary for conversion to joules must be provided. The CIPM, advised by the CCTC, should prepare a table giving, in joules per degree, the most accurate values that can be obtained from experiments on the specific heat of water.

A table, prepared in response to this request, was approved and published by the CIPM in 1950 (PV, 22, 92).

■ **Adoption of “degree Celsius” [CIPM, 1948 (PV, 21, 88) and 9th CGPM, 1948 (CR, 64)]**

From three names (“degree centigrade”, “centesimal degree”, “degree Celsius”) proposed to denote the degree of temperature, the CIPM has chosen “degree Celsius” (PV, 21, 88).

This name is also adopted by the 9th CGPM (CR, 64).

■ **Proposal for establishing a practical system of units of measurement (CR, 64)**

**Resolution 6**

The Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) has been requested by the International Union of Physics to adopt for international use a practical *Système International d’Unités*; that the International Union of Physics recommends the MKS system and one electric unit of the absolute practical system, but does not recommend that the CGS system be abandoned by physicists;
- that the CGPM has itself received from the French Government a similar request, accompanied by a draft to be used as basis of discussion for the establishment of a complete specification of units of measurement;

**instructs** the CIPM:

- to seek by an energetic, active, official enquiry the opinion of scientific, technical and educational circles of all countries (offering them, in fact, the French document as basis);
- to gather and study the answers;
- to make recommendations for a single practical system of units of measurement, suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention.

■ Writing and printing of unit symbols and of numbers (CR, 70)\*

Resolution 7

Principles

Roman (upright) type, in general lower-case, is used for symbols of units; if, however, the symbols are derived from proper names, capital roman type is used. These symbols are not followed by a full stop.

In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part. Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups.

Unit	Symbol	Unit	Symbol
• metre	m	ampere	A
• square metre	m <sup>2</sup>	volt	V
• cubic metre	m <sup>3</sup>	watt	W
• micron	μ	ohm	Ω
• litre	l	coulomb	C
• gram	g	farad	F
• tonne	t	henry	H
second	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dyne	dyn	newton	N
degree Celsius	°C	• candela (new candle)	cd
• degree absolute	°K	lux	lx
calorie	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hour	h		

Notes

1. The symbols whose unit names are preceded by dots are those which had already been adopted by a decision of the CIPM.
2. The symbol for the stère, the unit of volume for firewood, shall be “st” and not “s”, which had been previously assigned to it by the CIPM.
3. To indicate a temperature interval or difference, rather than a temperature, the word “degree” in full, or the abbreviation “deg”, must be used.

10th CGPM, 1954

■ Definition of the thermodynamic temperature scale (CR, 79)\*

Resolution 3

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures decides to define the thermodynamic temperature scale by choosing the triple point of water as the fundamental fixed point, and assigning to it the temperature 273.16 degrees Kelvin, exactly.

\* The CGPM abrogated certain decisions on units and terminology, in particular: micron, degree absolute, and the terms “degree”, and “deg”, 13th CGPM, 1967/68 (Resolutions 7 and 3, see pp. 170 and 169, respectively), and the litre; 16th CGPM, 1979 (Resolution 6, see p. 174).

\* The 13th CGPM in 1967 explicitly defined the kelvin (Resolution 4, see p. 169).

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

## ■ Definition of the standard atmosphere (CR, 79)

### Resolution 4

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), having noted that the definition of the standard atmosphere given by the 9th CGPM when defining the International Temperature Scale led some physicists to believe that this definition of the standard atmosphere was valid only for accurate work in thermometry,

**declares** that it adopts, for general use, the definition:

1 standard atmosphere = 1 013 250 dynes per square centimetre,  
i.e., 101 325 newtons per square metre.

## ■ Practical system of units (CR, 80)\*

### Resolution 6

In accordance with the wish expressed by the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in its Resolution 6 concerning the establishment of a practical system of units of measurement for international use, the 10th CGPM

**decides** to adopt as base units of the system, the following units:

length	metre
mass	kilogram
time	second
electric current	ampere
thermodynamic temperature	degree Kelvin
luminous intensity	candela

\* The unit name “degree kelvin” was changed to “kelvin” in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 3, see p. 169).

## CIPM, 1956

## ■ Definition of the unit of time (second) (PV, 25, 77)\*

### Resolution 1

In virtue of the powers invested in it by Resolution 5 of the 10th Conférence Générale des Poids et Mesures, the Comité International des Poids et Mesures,

**considering**

1. that the 9th General Assembly of the International Astronomical Union (Dublin, 1955) declared itself in favour of linking the second to the tropical year,
2. that, according to the decisions of the 8th General Assembly of the International Astronomical Union (Rome, 1952), the second of ephemeris time (ET) is the fraction

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ of the tropical year for 1900 January 0 at 12 h ET,}$$

**decides**

“The second is the fraction 1/31 556 925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time.”

\* This definition was abrogated in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 1, see p. 168).

## ■ **Système International d'Unités (PV, 25, 83)**

### **Resolution 3**

The Comité International des Poids et Mesures,

#### **considering**

- the task entrusted to it by Resolution 6 of the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) concerning the establishment of a practical system of units of measurement suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention,
- the documents received from twenty-one countries in reply to the enquiry requested by the 9th CGPM,
- Resolution 6 of the 10th CGPM, fixing the base units of the system to be established,

#### **recommends**

1. that the name "Système International d'Unités" be given to the system founded on the base units adopted by the 10th CGPM, viz.:

[This is followed by the list of the six base units with their symbols, reproduced in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

2. that the units listed in the table below be used, without excluding others which might be added later:

[This is followed by the table of units reproduced in paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

## **11th CGPM, 1960**

### ■ **Definition of the metre (CR, 85)\***

#### **Resolution 6**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

#### **considering**

- that the international Prototype does not define the metre with an accuracy adequate for the present needs of metrology,
- that it is moreover desirable to adopt a natural and indestructible standard,

#### **decides**

1. The metre is the length equal to 1 650 763.73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the krypton 86 atom.
2. The definition of the metre in force since 1889, based on the international Prototype of platinum-iridium, is abrogated.
3. The international Prototype of the metre sanctioned by the 1st CGPM in 1889 shall be kept at the BIPM under the conditions specified in 1889.

\* This definition was abrogated in 1983 by the 17th CGPM (Resolution 1, see p. 175).

### ■ **Definition of the unit of time (second) (CR, 86)\***

#### **Resolution 9**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

#### **considering**

- the powers given to the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) by the 10th CGPM to define the fundamental unit of time,
- the decision taken by the CIPM in 1956,

#### **ratifies** the following definition:

"The second is the fraction  $1/31\,556\,925.9747$  of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time."

\* This definition was abrogated in 1967 by the 13th CGPM (Resolution 1, see p. 168).

■ **Système International d’Unités (CR, 87)\***

**Resolution 12**

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- Resolution 6 of the 10th CGPM, by which it adopted six base units on which to establish a practical system of measurement for international use:

length	metre	m
mass	kilogram	kg
time	second	s
electric current	ampere	A
thermodynamic temperature	degree Kelvin	°K
luminous intensity	candela	cd
- Resolution 3 adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1956,
- the recommendations adopted by the CIPM in 1958 concerning an abbreviation for the name of the system, and prefixes to form multiples and submultiples of the units,

**decides**

- the system founded on the six base units above is called the “Système International d’Unités”;
- the international abbreviation of the name of the system is: SI;
- names of multiples and submultiples of the units are formed by means of the following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol	Multiplying factor	Prefix	Symbol
1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>	tera	T	0.1 = 10 <sup>-1</sup>	deci	d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	giga	G	0.01 = 10 <sup>-2</sup>	centi	c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	mega	M	0.001 = 10 <sup>-3</sup>	milli	m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	kilo	k	0.000 001 = 10 <sup>-6</sup>	micro	μ
100 = 10 <sup>2</sup>	hecto	h	0.000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 = 10 <sup>1</sup>	deca	da	0.000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	pico	p

- the units listed below are used in the system, without excluding others which might be added later.

**Supplementary units**

plane angle	radian	rad
solid angle	steradian	sr

\* The CGPM later abrogated certain of its decisions and extended the list of prefixes, see notes below.

The name and symbol for the unit of thermodynamic temperature was modified by the 13th CGPM in 1967 (Resolution 3, see p. 169).

A seventh base unit, the mole, was adopted by the 14th CGPM in 1971 (Resolution 3, see p. 172).

Further prefixes were adopted by the 12th CGPM in 1964 (Resolution 8, see p. 168), the 15th CGPM in 1975 (Resolution 10, see p. 173) and the 19th CGPM in 1991 (Resolution 4, see p. 179).

The 20th CGPM in 1995 abrogated the class of supplementary units in the SI (Resolution 8, see p. 179). These are now considered as derived units.

**Derived units**

area	square metre	$\text{m}^2$	
volume	cubic metre	$\text{m}^3$	
frequency	hertz	Hz	1/s
mass density (density)	kilogram per cubic metre	$\text{kg}/\text{m}^3$	
speed, velocity	metre per second	m/s	
angular velocity	radian per second	rad/s	
acceleration	metre per second squared	$\text{m}/\text{s}^2$	
angular acceleration	radian per second squared	$\text{rad}/\text{s}^2$	
force	newton	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
pressure (mechanical stress)	newton per square metre	$\text{N}/\text{m}^2$	
kinematic viscosity	square metre per second	$\text{m}^2/\text{s}$	
dynamic viscosity	newton-second per square metre	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	
work, energy, quantity of heat	joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
power	watt	W	J/s
quantity of electricity (side bar)	coulomb	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
tension (voltage), potential difference, electromotive force	volt	V	W/A
electric field strength	volt per metre	V/m	
electric resistance	ohm	$\Omega$	V/A
capacitance	farad	F	$\text{A} \cdot \text{s}/\text{V}$
magnetic flux	weber	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
inductance	henry	H	$\text{V} \cdot \text{s}/\text{A}$
magnetic flux density	tesla	T	$\text{Wb}/\text{m}^2$
magnetic field strength	ampere per metre	A/m	
magnetomotive force	ampere	A	
luminous flux	lumen	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
luminance	candela per square metre	$\text{cd}/\text{m}^2$	
illuminance	lux	lx	$\text{lm}/\text{m}^2$

The 13th CGPM in 1967 (Resolution 6, see p. 170) specified other units which should be added to the list. In principle, this list of derived units is without limit.

Modern practice is to use the phrase “amount of heat” rather than “quantity of heat”, because the word quantity has a different meaning in metrology.

Modern practice is to use the phrase “amount of electricity” rather than “quantity of electricity” (see note above).

## ■ Cubic decimetre and litre (CR, 88)

### Resolution 13

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

#### considering

- that the cubic decimetre and the litre are unequal and differ by about 28 parts in  $10^6$ ,
- that determinations of physical quantities which involve measurements of volume are being made more and more accurately, thus increasing the risk of confusion between the cubic decimetre and the litre,

**requests** the Comité International des Poids et Mesures to study the problem and submit its conclusions to the 12th CGPM.



**CIPM, 1961**■ **Cubic decimetre and litre** (PV, 29, 34)**Recommendation**

The Comité International des Poids et Mesures recommends that the results of accurate measurements of volume be expressed in units of the International System and not in litres.

**CIPM, 1964**■ **Atomic and molecular frequency standards** (PV, 32, 26)**Declaration**

The Comité International des Poids et Mesures,

**empowered** by Resolution 5 of the 12th Conférence Générale des Poids et Mesures to name atomic or molecular frequency standards for temporary use for time measurements in physics,

**declares** that the standard to be employed is the transition between the hyperfine levels  $F = 4$ ,  $M = 0$  and  $F = 3$ ,  $M = 0$  of the ground state  $^2S_{1/2}$  of the caesium 133 atom, unperturbed by external fields, and that the frequency of this transition is assigned the value 9 192 631 770 hertz.

**12th CGPM, 1964**■ **Atomic standard of frequency** (CR, 93)**Resolution 5**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th CGPM noted in its Resolution 10 the urgency, in the interests of accurate metrology, of adopting an atomic or molecular standard of time interval,
- that, in spite of the results already obtained with caesium atomic frequency standards, the time has not yet come for the CGPM to adopt a new definition of the second, base unit of the Système International d'Unités, because of the new and considerable improvements likely to be obtained from work now in progress,

**considering also** that it is not desirable to wait any longer before time measurements in physics are based on atomic or molecular frequency standards,

**empowers** the Comité International des Poids et Mesures to name the atomic or molecular frequency standards to be employed for the time being,

**requests** the organizations and laboratories knowledgeable in this field to pursue work connected with a new definition of the second.

■ **Litre** (CR, 93)**Resolution 6**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** Resolution 13 adopted by the 11th CGPM in 1960 and the Recommendation adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1961,

1. **abrogates** the definition of the litre given in 1901 by the 3rd CGPM,
2. **declares** that the word "litre" may be employed as a special name for the cubic decimetre,
3. **recommends** that the name litre should not be employed to give the results of high-accuracy volume measurements.

■ **Curie (CR, 94)\***

**Resolution 7**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures,  
**considering** that the curie has been used for a long time in many countries as unit of activity for radionuclides,  
**recognizing** that in the Système International d'Unités (SI), the unit of this activity is the second to the power of minus one ( $s^{-1}$ ),  
**accepts** that the curie be still retained, outside SI, as unit of activity, with the value  $3.7 \times 10^{10} s^{-1}$ .  
The symbol for this unit is Ci.

\* The name "becquerel" (Bq) was adopted by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 8, see p. 172) for the SI unit of activity:  
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

■ **SI prefixes femto and atto (CR, 94)\***

**Resolution 8**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)  
**decides** to add to the list of prefixes for the formation of names of multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the following two new prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

\* New prefixes were added by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 10, see p. 173).

**CIPM, 1967**

■ **Decimal multiples and submultiples of the unit of mass (PV, 35, 29 and *Metrologia*, 1968, 4, 45)**

**Recommendation 2**

The Comité International des Poids et Mesures,  
**considering** that the rule for forming names of decimal multiples and submultiples of the units of paragraph 3 of Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1960) might be interpreted in different ways when applied to the unit of mass,  
**declares** that the rules of Resolution 12 of the 11th CGPM apply to the kilogram in the following manner: the names of decimal multiples and submultiples of the unit of mass are formed by attaching prefixes to the word "gram".

**13th CGPM, 1967/68**

■ **SI unit of time (second) (CR, 103 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)**

**Resolution 1**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that the definition of the second adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1956 (Resolution 1) and ratified by Resolution 9 of the 11th CGPM (1960), later upheld by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), is inadequate for the present needs of metrology,
- that at its meeting of 1964 the CIPM, empowered by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), recommended, in order to fulfil these requirements, a caesium atomic frequency standard for temporary use,
- that this frequency standard has now been sufficiently tested and found sufficiently accurate to provide a definition of the second fulfilling present requirements,
- that the time has now come to replace the definition now in force of the unit of time of the Système International d'Unités by an atomic definition based on that standard,

**decides**

1. The SI unit of time is the second defined as follows:  
“The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom”;
2. Resolution 1 adopted by the CIPM at its meeting of 1956 and Resolution 9 of the 11th CGPM are now abrogated.

■ **SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

**Resolution 3**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the names “degree Kelvin” and “degree”, the symbols “°K” and “deg” and the rules for their use given in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948), in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960), and the decision taken by the Comité International des Poids et Mesures in 1962 (PV, 30, 27),
- that the unit of thermodynamic temperature and the unit of temperature interval are one and the same unit, which ought to be denoted by a single name and a single symbol,

**decides**

1. the unit of thermodynamic temperature is denoted by the name “kelvin” and its symbol is “K”;
2. the same name and the same symbol are used to express a temperature interval;
3. a temperature interval may also be expressed in degrees Celsius;
4. the decisions mentioned in the opening paragraph concerning the name of the unit of thermodynamic temperature, its symbol and the designation of the unit to express an interval or a difference of temperatures are abrogated, but the usages which derive from these decisions remain permissible for the time being.

■ **Definition of the SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43)\*

**Resolution 4**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that it is useful to formulate more explicitly the definition of the unit of thermodynamic temperature contained in Resolution 3 of the 10th CGPM (1954),

**decides** to express this definition as follows:

“The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water.”

■ **SI unit of luminous intensity (candela)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43-44)\*

**Resolution 5**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the definition of the unit of luminous intensity ratified by the 9th CGPM (1948) and contained in the “Resolution concerning the change of photometric units” adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1946 (PV, 20, 119) in virtue of the powers conferred by the 8th CGPM (1933),
- that this definition fixes satisfactorily the unit of luminous intensity, but that its wording may be open to criticism,

At its 1997 meeting, the CIPM affirmed that this definition refers to a caesium atom at rest at a thermodynamic temperature of 0 K. The wording of the definition of the second was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

\* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU, which requested that the use of the symbols “°K” and “deg” no longer be permitted.

\*\* See Recommendation 2 (CI-2005) of the CIPM on the isotopic composition of water entering in the definition of the kelvin, p. 184.

\* See Recommendation 5 (CI-1989) of the CIPM on the International Temperature Scale of 1990, p. 178.

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

\* This definition was abrogated by the 16th CGPM in 1979 (Resolution 3, see p. 173).

**decides** to express the definition of the candela as follows:

"The candela is the luminous intensity, in the perpendicular direction, of a surface of 1/600 000 square metre of a black body at the temperature of freezing platinum under a pressure of 101 325 newtons per square metre."

■ **SI derived units** (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44)\*

**Resolution 6**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that it is useful to add some derived units to the list of paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960),

**decides** to add:

wave number	1 per metre	$\text{m}^{-1}$
entropy	joule per kelvin	J/K
specific heat capacity	joule per kilogram kelvin	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
thermal conductivity	watt per metre kelvin	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
radiant intensity	watt per steradian	W/sr
activity (of a radioactive source)	1 per second	$\text{s}^{-1}$

\* The unit of activity was given a special name and symbol by the 15th CGPM in 1975 (Resolution 8, see p. 172).

■ **Abrogation of earlier decisions (micron and new candle)** (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44)

**Resolution 7**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that subsequent decisions of the General Conference concerning the *Système International d'Unités* are incompatible with parts of Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

**decides** accordingly to remove from Resolution 7 of the 9th Conference:

1. the unit name "micron", and the symbol "μ" which had been given to that unit but which has now become a prefix;
2. the unit name "new candle".

**CIPM, 1969**

■ **Système International d'Unités, Rules for application of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)** (PV, 37, 30 and *Metrologia*, 1970, 6, 66)\*

**Recommendation 1**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** that Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1960), concerning the *Système International d'Unités*, has provoked discussions on certain of its aspects,

**declares**

1. the base units, the supplementary units and the derived units of the *Système International d'Unités*, which form a coherent set, are denoted by the name "SI units";\*\*
2. the prefixes adopted by the CGPM for the formation of decimal multiples and submultiples of SI units are called "SI prefixes";

and **recommends**

3. the use of SI units and of their decimal multiples and submultiples whose names are formed by means of SI prefixes.

Note: The name "supplementary units", appearing in Resolution 12 of the 11th CGPM (and in the present Recommendation) is given to SI units for which the General Conference declines to state whether they are base units or derived units.

\* The 20th CGPM in 1995 decided to abrogate the class of supplementary units in the SI (Resolution 8, see p. 179).

\*\* The CIPM approved in 2001 a proposal of the CCU to clarify the definition of "SI units" and "units of the SI", see p. 180.

**CCDS, 1970 (In CIPM, 1970)****■ Definition of TAI (PV, 38, 110-111 and *Metrologia*, 1971, 7, 43)****Recommendation S 2**

International Atomic Time (TAI) is the time reference coordinate established by the Bureau International de l'Heure on the basis of the readings of atomic clocks operating in various establishments in accordance with the definition of the second, the unit of time of the International System of Units.

In 1980, the definition of TAI was completed as follows (declaration of the CCDS, *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, 9, S 15 and *Metrologia*, 1981, 17, 70):

TAI is a coordinate time scale defined in a geocentric reference frame with the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit.

This definition was further amplified by the International Astronomical Union in 1991, Resolution A4:

“TAI is a realized time scale whose ideal form, neglecting a constant offset of 32.184 s, is Terrestrial Time (TT), itself related to the time coordinate of the geocentric reference frame, Geocentric Coordinate Time (TCG), by a constant rate.”

(see Proc. 21st General Assembly of the IAU, *IAU Trans.*, 1991, vol. **XXIB**, Kluwer.)

**14th CGPM, 1971****■ Pascal and siemens (CR, 78)**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures adopted the special names “pascal” (symbol Pa), for the SI unit newton per square metre, and “siemens” (symbol S), for the SI unit of electric conductance [reciprocal ohm].

**■ International Atomic Time, function of CIPM (CR, 77-78 and *Metrologia*, 1972, 8, 35)****Resolution 1**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the second, unit of time of the Système International d'Unités, has since 1967 been defined in terms of a natural atomic frequency, and no longer in terms of the time scales provided by astronomical motions,
- that the need for an International Atomic Time (TAI) scale is a consequence of the atomic definition of the second,
- that several international organizations have ensured and are still successfully ensuring the establishment of the time scales based on astronomical motions, particularly thanks to the permanent services of the Bureau International de l'Heure (BIH),
- that the BIH has started to establish an atomic time scale of recognized quality and proven usefulness,
- that the atomic frequency standards for realizing the second have been considered and must continue to be considered by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) helped by a Consultative Committee, and that the unit interval of the International Atomic Time scale must be the second realized according to its atomic definition,
- that all the competent international scientific organizations and the national laboratories active in this field have expressed the wish that the CIPM and the CGPM should give a definition of International Atomic Time, and should contribute to the establishment of the International Atomic Time scale,
- that the usefulness of International Atomic Time entails close coordination with the time scales based on astronomical motions,

**requests the CIPM**

1. to give a definition of International Atomic Time,
2. to take the necessary steps, in agreement with the international organizations concerned, to ensure that available scientific competence and existing facilities are used in the best possible way to realize the International Atomic Time scale and to satisfy the requirements of users of International Atomic Time.

The definition of TAI was given by the CCDS in 1970 (now the CCTF), see CCDS report p. 22.

■ **SI unit of amount of substance (mole)** (CR, 78 and *Metrologia*, 1972, **8**, 36)\*

**Resolution 3**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** the advice of the International Union of Pure and Applied Physics, of the International Union of Pure and Applied Chemistry, and of the International Organization for Standardization, concerning the need to define a unit of amount of substance,

**decides**

1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is “mol”.\*\*
2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
3. The mole is a base unit of the Système International d'Unités.

\* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU (1980) specifying that, in this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to.

\*\* The mole was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

**15th CGPM, 1975**

■ **Recommended value for the speed of light** (CR, 103 and *Metrologia*, 1975, **11**, 179-180)

**Resolution 2**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** the excellent agreement among the results of wavelength measurements on the radiations of lasers locked on a molecular absorption line in the visible or infrared region, with an uncertainty estimated at  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which corresponds to the uncertainty of the realization of the metre,

**considering** also the concordant measurements of the frequencies of several of these radiations,

**recommends** the use of the resulting value for the speed of propagation of electromagnetic waves in vacuum  $c = 299\,792\,458$  metres per second.

The relative uncertainty given here corresponds to three standard deviations in the data considered.

■ **Coordinated Universal Time (UTC)** (CR, 104 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180)

**Resolution 5**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** that the system called “Coordinated Universal Time” (UTC) is widely used, that it is broadcast in most radio transmissions of time signals, that this wide diffusion makes available to the users not only frequency standards but also International Atomic Time and an approximation to Universal Time (or, if one prefers, mean solar time),

**notes** that this Coordinated Universal Time provides the basis of civil time, the use of which is legal in most countries,

**judgets** that this usage can be strongly endorsed.

■ **SI units for ionizing radiation (becquerel and gray)** (CR, 105 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180)\*

**Resolutions 8 and 9**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

by reason of the pressing requirement, expressed by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), to extend the use of the Système International d'Unités to radiological research and applications,

by reason of the need to make as easy as possible the use of the units for nonspecialists,

taking into consideration also the grave risks of errors in therapeutic work,

**adopts** the following special name for the SI unit of activity:

\* At its 1976 meeting, the CIPM approved the report of the 5th meeting of the CCU (1976), specifying that, following the advice of the ICRU, the gray may also be used to express specific energy imparted, kerma and absorbed dose index.

**becquerel**, symbol Bq, equal to one reciprocal second (Resolution 8),

**adopts** the following special name for the SI unit of ionizing radiation:

**gray**, symbol Gy, equal to one joule per kilogram (Resolution 9).

Note: The gray is the SI unit of absorbed dose. In the field of ionizing radiation, the gray may be used with other physical quantities also expressed in joules per kilogram: the Comité Consultatif des Unités has responsibility for studying this matter in collaboration with the competent international organizations.

## ■ SI prefixes peta and exa (CR, 106 and *Metrologia*, 1975, 11, 180-181)\*

\* New prefixes were added by the 19th CGPM in 1991 (Resolution 4, see p. 179).

### Resolution 10

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples, which was adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the two following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{15}$	peta	P
$10^{18}$	exa	E

## 16th CGPM, 1979

## ■ SI unit of luminous intensity (candela) (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56)

### Resolution 3

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that despite the notable efforts of some laboratories there remain excessive divergences between the results of realizations of the candela based upon the present black body primary standard,
- that radiometric techniques are developing rapidly, allowing precisions that are already equivalent to those of photometry and that these techniques are already in use in national laboratories to realize the candela without having to construct a black body,
- that the relation between luminous quantities of photometry and radiometric quantities, namely the value of 683 lumens per watt for the spectral luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz, has been adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1977,
- that this value has been accepted as being sufficiently accurate for the system of luminous photopic quantities, that it implies a change of only about 3 % for the system of luminous scotopic quantities, and that it therefore ensures satisfactory continuity,
- that the time has come to give the candela a definition that will allow an improvement in both the ease of realization and the precision of photometric standards, and that applies to both photopic and scotopic photometric quantities and to quantities yet to be defined in the mesopic field,

**decides**

1. The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz and that has a radiant intensity in that direction of 1/683 watt per steradian.
2. The definition of the candela (at the time called new candle) adopted by the CIPM in 1946 by reason of the powers conferred by the 8th CGPM in 1933, ratified by the 9th CGPM in 1948, then amended by the 13th CGPM in 1967, is abrogated.

The wording of the definition of the candela was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

Photopic vision is detected by the cones on the retina of the eye, which are sensitive to a high level of luminance ( $L > \text{ca. } 10 \text{ cd/m}^2$ ) and are used in daytime vision.

Scotopic vision is detected by the rods of the retina, which are sensitive to low level luminance ( $L < \text{ca. } 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ), used in night vision.

In the domain between these levels of luminance both cones and rods are used, and this is described as mesopic vision.

■ **Special name for the SI unit of dose equivalent (sievert)** (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56)\*

#### Resolution 5

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the effort made to introduce SI units into the field of ionizing radiations,
- the risk to human beings of an underestimated radiation dose, a risk that could result from a confusion between absorbed dose and dose equivalent,
- that the proliferation of special names represents a danger for the *Système International d'Unités* and must be avoided in every possible way, but that this rule can be broken when it is a matter of safeguarding human health,

**adopts** the special name *sievert*, symbol Sv, for the SI unit of dose equivalent in the field of radioprotection. The sievert is equal to the joule per kilogram.

\* The CIPM, in 1984, decided to accompany this Resolution with an explanation (Recommendation 1, see p. 176).

■ **Symbols for the litre** (CR, 101 and *Metrologia*, 1980, 16, 56-57)

#### Resolution 6

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**recognizing** the general principles adopted for writing the unit symbols in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

**considering** that the symbol l for the unit litre was adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1879 and confirmed in the same Resolution of 1948,

**considering** also that, in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1, several countries have adopted the symbol L instead of l for the unit litre,

**considering** that the name litre, although not included in the *Système International d'Unités*, must be admitted for general use with the System,

**decides**, as an exception, to adopt the two symbols l and L as symbols to be used for the unit litre,

**considering** further that in the future only one of these two symbols should be retained,

**invites** the CIPM to follow the development of the use of these two symbols and to give the 18th CGPM its opinion as to the possibility of suppressing one of them.

The CIPM, in 1990, considered that it was still too early to choose a single symbol for the litre.

### CIPM, 1980

■ **SI supplementary units (radian and steradian)** (PV, 48, 24 and *Metrologia*, 1981, 17, 72)\*

#### Recommendation 1

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

**taking into consideration** Resolution 3 adopted by ISO/TC 12 in 1978 and Recommendation U 1 (1980) adopted by the Comité Consultatif des Unités at its 7th meeting,

**considering**

- that the units radian and steradian are usually introduced into expressions for units when there is need for clarification, especially in photometry where the steradian plays an important role in distinguishing between units corresponding to different quantities,
- that in the equations used one generally expresses plane angle as the ratio of two lengths and solid angle as the ratio between an area and the square of a length, and consequently that these quantities are treated as dimensionless quantities,
- that the study of the formalisms in use in the scientific field shows that none exists which is at the same time coherent and convenient and in which the quantities plane angle and solid angle might be considered as base quantities,

\* The class of SI supplementary units was abrogated by decision of the 20th CGPM in 1995 (Resolution 8, see p. 179).



**considering also**

- that the interpretation given by the CIPM in 1969 for the class of supplementary units introduced in Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in 1960 allows the freedom of treating the radian and the steradian as SI base units,
- that such a possibility compromises the internal coherence of the SI based on only seven base units,

**decides** to interpret the class of supplementary units in the International System as a class of dimensionless derived units for which the CGPM allows the freedom of using or not using them in expressions for SI derived units.

**17th CGPM, 1983**

■ **Definition of the metre** (CR, 97 and *Metrologia*, 1984, **20**, 25)

**Resolution 1**

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the present definition does not allow a sufficiently precise realization of the metre for all requirements,
- that progress made in the stabilization of lasers allows radiations to be obtained that are more reproducible and easier to use than the standard radiation emitted by a krypton 86 lamp,
- that progress made in the measurement of the frequency and wavelength of these radiations has resulted in concordant determinations of the speed of light whose accuracy is limited principally by the realization of the present definition of the metre,
- that wavelengths determined from frequency measurements and a given value for the speed of light have a reproducibility superior to that which can be obtained by comparison with the wavelength of the standard radiation of krypton 86,
- that there is an advantage, notably for astronomy and geodesy, in maintaining unchanged the value of the speed of light recommended in 1975 by the 15th CGPM in its Resolution 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s),
- that a new definition of the metre has been envisaged in various forms all of which have the effect of giving the speed of light an exact value, equal to the recommended value, and that this introduces no appreciable discontinuity into the unit of length, taking into account the relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  of the best realizations of the present definition of the metre,
- that these various forms, making reference either to the path travelled by light in a specified time interval or to the wavelength of a radiation of measured or specified frequency, have been the object of consultations and deep discussions, have been recognized as being equivalent and that a consensus has emerged in favour of the first form,
- that the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) is now in a position to give instructions for the practical realization of such a definition, instructions which could include the use of the orange radiation of krypton 86 used as standard up to now, and which may in due course be extended or revised,

**decides**

1. The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second,
2. The definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the atom of krypton 86, is abrogated.

The wording of the definition of the metre was modified by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

The relative uncertainty given here corresponds to three standard deviations in the data considered.

■ **On the realization of the definition of the metre** (CR, 98 and *Metrologia*, 1984, 20, 25-26)

**Resolution 2**

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**invites** the Comité International des Poids et Mesures

- to draw up instructions for the practical realization of the new definition of the metre,
- to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and to draw up instructions for their use,
- to pursue studies undertaken to improve these standards.

See Recommendation 1 (CI-2002) of the CIPM on the revision of the practical realization of the definition of the metre, p. 181.

**CIPM, 1984**

■ **Concerning the sievert** (PV, 52, 31 and *Metrologia*, 1985, 21, 90)\*

**Recommendation 1**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** the confusion which continues to exist on the subject of Resolution 5, approved by the 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (1979),

**decides** to introduce the following explanation in the brochure “Le Système International d’Unités (SI)”:

The quantity dose equivalent  $H$  is the product of the absorbed dose  $D$  of ionizing radiation and the dimensionless factors  $Q$  (quality factor) and  $N$  (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection:

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

Thus, for a given radiation, the numerical value of  $H$  in joules per kilogram may differ from that of  $D$  in joules per kilogram depending upon the values of  $Q$  and  $N$ . In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose  $D$  and the dose equivalent  $H$ , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose  $D$  and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent  $H$ .

\* The CIPM, in 2002, decided to change the explanation of the quantity dose equivalent in the SI Brochure (Recommendation 2, see p. 182).

**18th CGPM, 1987**

■ **Forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm** (CR, 100 and *Metrologia*, 1988, 25, 115)

**Resolution 6**

The 18th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- that worldwide uniformity and long-term stability of national representations of the electrical units are of major importance for science, commerce and industry from both the technical and economic points of view,
- that many national laboratories use the Josephson effect and are beginning to use the quantum Hall effect to maintain, respectively, representations of the volt and of the ohm, as these offer the best guarantees of long-term stability,
- that because of the importance of coherence among the units of measurement of the various physical quantities the values adopted for these representations must be as closely as possible in agreement with the SI,
- that the results of recent and current experiment will permit the establishment of an acceptable value, sufficiently compatible with the SI, for the coefficient which relates each of these effects to the corresponding electrical unit,

**invites** the laboratories whose work can contribute to the establishment of the quotient voltage/frequency in the case of the Josephson effect and of the quotient voltage/current for the quantum Hall effect to vigorously pursue these efforts and to communicate their results without delay to the Comité International des Poids et Mesures, and

**instructs** the Comité International des Poids et Mesures to recommend, as soon as it considers it possible, a value for each of these quotients together with a date for them to be put into practice simultaneously in all countries; these values should be announced at least one year in advance and would be adopted on 1 January 1990.

## CIPM, 1988

■ **Representation of the volt by means of the Josephson effect** (PV, 56, 44 and *Metrologia*, 1989, 26, 69)\*

\* The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) abrogated the adoption of a conventional value for  $K_J$ .

### Recommendation 1

The Comité International des Poids et Mesures,

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

**considering**

- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of 483 597.9 GHz/V for the Josephson constant,  $K_J$ , that is to say, for the quotient of frequency divided by the potential difference corresponding to the  $n=1$  step in the Josephson effect,
- that the Josephson effect, together with this value of  $K_J$ , can be used to establish a reference standard of electromotive force having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the volt estimated to be 4 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that 483 597.9 GHz/V exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $K_{J-90}$  for the Josephson constant,  $K_J$ ,
- that this new value be used from 1 January 1990, and not before, to replace the values currently in use,
- that this new value be used from this same date by all laboratories which base their measurements of electromotive force on the Josephson effect, and
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with the new adopted value,

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the Josephson constant will be necessary in the foreseeable future, and

**draws the attention** of laboratories to the fact that the new value is greater by 3.9 GHz/V, or about 8 parts in  $10^6$ , than the value given in 1972 by the Comité Consultatif d'Électricité in its Declaration E-72.

■ **Representation of the ohm by means of the quantum Hall effect** (PV, 56, 45 and *Metrologia*, 1989, 26, 70)\*

At its 89th meeting in 2000, the CIPM approved the declaration of the 22nd meeting of the CCEM on the use of the value of the von Klitzing constant.

### Recommendation 2

The Comité International des Poids et Mesures,

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

\*The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) abrogated the adoption of a conventional value for  $R_K$ .

**considering**

- that most existing laboratory reference standards of resistance change significantly with time,
- that a laboratory reference standard of resistance based on the quantum Hall effect would be stable and reproducible,
- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of  $25\,812.807\,\Omega$  for the von Klitzing constant,  $R_K$ , that is to say, for the quotient of the Hall potential difference divided by current corresponding to the plateau  $i = 1$  in the quantum Hall effect,
- that the quantum Hall effect, together with this value of  $R_K$ , can be used to establish a reference standard of resistance having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the ohm estimated to be 2 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that  $25\,812.807\,\Omega$  exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $R_{K-90}$ , for the von Klitzing constant,  $R_K$ ,
- that this value be used from 1 January 1990, and not before, by all laboratories which base their measurements of resistance on the quantum Hall effect,
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with  $R_{K-90}$ ,
- that in the use of the quantum Hall effect to establish a laboratory reference standard of resistance, laboratories follow the most recent edition of the technical guidelines for reliable measurements of the quantized Hall resistance drawn up by the Comité Consultatif d'Électricité and published by the Bureau International des Poids et Mesures, and

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the von Klitzing constant will be necessary in the foreseeable future.

**CIPM, 1989**

■ **The International Temperature Scale of 1990** (PV, 57, 115 and *Metrologia*, 1990, 27, 13)

The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

**Recommendation 5**

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) acting in accordance with Resolution 7 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987) has adopted the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) to supersede the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68).

The CIPM **notes** that, by comparison with the IPTS-68, the ITS-90

- extends to lower temperatures, down to 0.65 K, and hence also supersedes the EPT-76,
- is in substantially better agreement with corresponding thermodynamic temperatures,
- has much improved continuity, precision and reproducibility throughout its range and
- has subranges and alternative definitions in certain ranges which greatly facilitate its use.

The CIPM also **notes** that, to accompany the text of the ITS-90 there will be two further documents, the *Supplementary Information for the ITS-90* and *Techniques for Approximating the ITS-90*. These documents will be published by the BIPM and periodically updated.

**The CIPM recommends**

- that on 1 January 1990 the ITS-90 come into force and
- that from this same date the IPTS-68 and the EPT-76 be abrogated.

**19th CGPM, 1991****■ SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto (CR, 185 and *Metrologia*, 1992, 29, 3)****Resolution 4**

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

The names zepto and zetta are derived from septo suggesting the number seven (the seventh power of  $10^3$ ) and the letter “z” is substituted for the letter “s” to avoid the duplicate use of the letter “s” as a symbol. The names yocto and yotta are derived from octo, suggesting the number eight (the eighth power of  $10^3$ ); the letter “y” is added to avoid the use of the letter “o” as a symbol because it may be confused with the number zero.

**20th CGPM, 1995****■ Elimination of the class of supplementary units in the SI (CR, 223 and *Metrologia*, 1996, 33, 83)****Resolution 8**

The 20th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th Conférence Générale in 1960 in its Resolution 12, establishing the Système International d’Unités, SI, distinguished between three classes of SI units: the base units, the derived units, and the supplementary units, the last of these comprising the radian and the steradian,
- that the status of the supplementary units in relation to the base units and the derived units gave rise to debate,
- that the Comité International des Poids et Mesures, in 1980, having observed that the ambiguous status of the supplementary units compromises the internal coherence of the SI, has in its Recommendation 1 (CI-1980) interpreted the supplementary units, in the SI, as dimensionless derived units,

**approving** the interpretation given by the Comité International in 1980,

**decides**

- to interpret the supplementary units in the SI, namely the radian and the steradian, as dimensionless derived units, the names and symbols of which may, but need not, be used in expressions for other SI derived units, as is convenient,
- and, consequently, to eliminate the class of supplementary units as a separate class in the SI.

**21st CGPM, 1999****■ The definition of the kilogram (CR, 331 and *Metrologia*, 2000, 37, 94)****Resolution 7**

The 21st Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the need to assure the long-term stability of the International System of Units (SI),
- the intrinsic uncertainty in the long-term stability of the artefact defining the unit of mass, one of the base units of the SI,
- the consequent uncertainty in the long-term stability of the other three base units of the SI that depend on the kilogram, namely, the ampere, the mole and the candela,

- the progress already made in a number of different experiments designed to link the unit of mass to fundamental or atomic constants,
- the desirability of having more than one method of making such a link,

**recommends** that national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram.

■ **Special name for the SI derived unit mole per second, the katal, for the expression of catalytic activity** (CR, 334-335 and *Metrologia*, 2000, 37, 95)

**Resolution 12**

The 21st Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the importance for human health and safety of facilitating the use of SI units in the fields of medicine and biochemistry,
- that a non-SI unit called “unit”, symbol U, equal to  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ , which is not coherent with the International System of Units (SI), has been in widespread use in medicine and biochemistry since 1964 for expressing catalytic activity,
- that the absence of a special name for the SI coherent derived unit mole per second has led to results of clinical measurements being given in various local units,
- that the use of SI units in medicine and clinical chemistry is strongly recommended by the international unions in these fields,
- that the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine has asked the Consultative Committee for Units to recommend the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second,
- that while the proliferation of special names represents a danger for the SI, exceptions are made in matters related to human health and safety (15th General Conference, 1975, Resolutions 8 and 9, 16th General Conference, 1979, Resolution 5),

**noting** that the name katal, symbol kat, has been used for the SI unit mole per second for over thirty years to express catalytic activity,

**decides** to adopt the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second to express catalytic activity, especially in the fields of medicine and biochemistry,

and **recommends** that when the katal is used, the measurand be specified by reference to the measurement procedure; the measurement procedure must identify the indicator reaction.

**CIPM, 2001**

■ **“SI units” and “units of the SI”** (PV, 69, 120)

The CIPM approved in 2001 the following proposal of the CCU regarding “SI units” and “units of the SI”:

“We suggest that “SI units” and “units of the SI” should be regarded as names that include both the base units and the coherent derived units, and also all units obtained by combining these with the recommended multiple and sub-multiple prefixes.

We suggest that the name “coherent SI units” should be used when it is desired to restrict the meaning to only the base units and the coherent derived units.”

## CIPM, 2002

■ **Revision of the practical realization of the definition of the metre** (PV, 70, 194-204 and *Metrologia*, 40, 103-133)

### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

#### recalling

- that in 1983 the 17th General Conference (CGPM) adopted a new definition of the metre;
- that in the same year the CGPM invited the International Committee (CIPM)
  - to draw up instructions for the practical realization of the metre,
  - to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and draw up instructions for their use,
  - to pursue studies undertaken to improve these standards and in due course to extend or revise these instructions;
- that in response to this invitation the CIPM adopted Recommendation 1 (CI-1983) (*mise en pratique* of the definition of the metre) to the effect
  - that the metre should be realized by one of the following methods:
    - (a) by means of the length  $l$  of the path travelled in vacuum by a plane electromagnetic wave in a time  $t$ ; this length is obtained from the measured time  $t$ , using the relation  $l = c_0 \cdot t$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - (b) by means of the wavelength in vacuum  $\lambda$  of a plane electromagnetic wave of frequency  $f$ ; this wavelength is obtained from the measured frequency  $f$  using the relation  $\lambda = c_0 / f$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - (c) by means of one of the radiations from the list below, whose stated wavelength in vacuum or whose stated frequency can be used with the uncertainty shown, provided that the given specifications and accepted good practice are followed;
  - that in all cases any necessary corrections be applied to take account of actual conditions such as diffraction, gravitation or imperfection in the vacuum;
  - that in the context of general relativity, the metre is considered a unit of proper length. Its definition, therefore, applies only within a spatial extent sufficiently small that the effects of the non-uniformity of the gravitational field can be ignored (note that, at the surface of the Earth, this effect in the vertical direction is about 1 part in  $10^{16}$  per metre). In this case, the effects to be taken into account are those of special relativity only. The local methods for the realization of the metre recommended in (b) and (c) provide the proper metre but not necessarily that given in (a). Method (a) should therefore be restricted to lengths  $l$  which are sufficiently short for the effects predicted by general relativity to be negligible with respect to the uncertainties of realization. For advice on the interpretation of measurements in which this is not the case, see the report of the Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Working Group on the Application of General Relativity to Metrology (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, 34, 261-290);
- that the CIPM had already recommended a list of radiations for this purpose;

**recalling** also that in 1992 and in 1997 the CIPM revised the practical realization of the definition of the metre;

#### considering

- that science and technology continue to demand improved accuracy in the realization of the metre;
- that since 1997 work in national laboratories, in the BIPM and elsewhere has identified new radiations and methods for their realization which lead to lower uncertainties;

- that there is an increasing move towards optical frequencies for time-related activities, and that there continues to be a general widening of the scope of application of the recommended radiations of the *mise en pratique* to cover not only dimensional metrology and the realization of the metre, but also high-resolution spectroscopy, atomic and molecular physics, fundamental constants and telecommunication;
- that a number of new frequency values with reduced uncertainties for radiations of high-stability cold atom and ion standards already listed in the recommended radiations list are now available, that the frequencies of radiations of several new cold atom and ion species have also recently been measured, and that new improved values with substantially reduced uncertainties for a number of optical frequency standards based on gas cells have been determined, including the wavelength region of interest to optical telecommunications;
- that new femtosecond comb techniques have clear significance for relating the frequency of high-stability optical frequency standards to that of the frequency standard realizing the SI second, that these techniques represent a convenient measurement technique for providing traceability to the International System of Units (SI) and that comb technology also can provide frequency sources as well as a measurement technique;

**recognizes** comb techniques as timely and appropriate, and recommends further research to fully investigate the capability of the techniques;

**welcomes** validations now being made of comb techniques by comparison with other frequency chain techniques;

**urges** national metrology institutes and other laboratories to pursue the comb technique to the highest level of accuracy achievable and also to seek simplicity so as to encourage widespread application;

#### **recommends**

- that the list of recommended radiations given by the CIPM in 1997 (Recommendation 1 (CI-1997)) be replaced by the list of radiations given below\*, including
  - updated frequency values for cold Ca atom, H atom and the trapped  $\text{Sr}^+$  ion,
  - frequency values for new cold ion species including trapped  $\text{Hg}^+$  ion, trapped  $\text{In}^+$  ion and trapped  $\text{Yb}^+$  ion,
  - updated frequency values for Rb-stabilized lasers,  $\text{I}_2$ -stabilized Nd:YAG and He-Ne lasers,  $\text{CH}_4$ -stabilized He-Ne lasers and  $\text{OsO}_4$ -stabilized  $\text{CO}_2$  lasers at 10  $\mu\text{m}$ ,
  - frequency values for standards relevant to the optical communications bands, including Rb- and  $\text{C}_2\text{H}_2$ -stabilized lasers.

...

\* The list of recommended radiations, Recommendation 1 (CI-2002), is given in PV, 70, 197-204 and *Metrologia*, 2003, 40, 104-115.

#### ■ Dose equivalent (PV, 70, 205)

See also *J. Radiol. Prot.*, 2005, 25, 97-100.

#### **Recommendation 2**

The International Committee for Weights and Measures,

**considering** that

- the current definition of the SI unit of dose equivalent (sievert) includes a factor “*N*” (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), and
- both the ICRP and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) have decided to delete this factor *N* as it is no longer deemed to be necessary, and
- the current SI definition of *H* including the factor *N* is causing some confusion,

**decides** to change the explanation in the brochure “Le Système International d’Unités (SI)” to the following:

The quantity dose equivalent *H* is the product of the absorbed dose *D* of ionizing radiation and the dimensionless factor *Q* (quality factor) defined as a function of linear energy transfer by the ICRU:

$$H = Q \cdot D.$$



Thus, for a given radiation, the numerical value of  $H$  in joules per kilogram may differ from that of  $D$  in joules per kilogram depending on the value of  $Q$ .

The Committee further **decides** to maintain the final sentence in the explanation as follows:

In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose  $D$  and the dose equivalent  $H$ , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose  $D$  and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent  $H$ .

## CIPM, 2003

■ **Revision of the *Mise en Pratique* list of recommended radiations** (PV, 71, 146 and *Metrologia*, 2004, 41, 99-100)

### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

**considering** that

- improved frequency values for radiations of some high-stability cold ion standards already documented in the recommended radiations list have recently become available;
- improved frequency values for the infra-red gas-cell-based optical frequency standard in the optical telecommunications region, already documented in the recommended radiations list, have been determined;
- femtosecond comb-based frequency measurements for certain iodine gas-cell standards on the subsidiary recommended source list have recently been made for the first time, leading to significantly reduced uncertainty;

**proposes** that the *recommended radiation* list be revised to include the following:

- updated frequency values for the single trapped  $^{88}\text{Sr}^+$  ion quadrupole transition and the single trapped  $^{171}\text{Yb}^+$  octupole transition;
- an updated frequency value for the  $\text{C}_2\text{H}_2$ -stabilized standard at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- updated frequency values for the  $\text{I}_2$ -stabilized standards at 543 nm and 515 nm.

## 22nd CGPM, 2003

■ **Symbol for the decimal marker** (CR, 381 and *Metrologia*, 2004, 41, 104)

### Resolution 10

The 22nd General Conference,

**considering** that

- a principal purpose of the International System of Units (SI) is to enable values of quantities to be expressed in a manner that can be readily understood throughout the world,
- the value of a quantity is normally expressed as a number times a unit,
- often the number in the expression of the value of a quantity contains multiple digits with an integral part and a decimal part,
- in Resolution 7 of the 9th General Conference, 1948, it is stated that "In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part",
- following a decision of the International Committee made at its 86th meeting (1997), the International Bureau of Weights and Measures now uses the dot (point on the line) as the decimal marker in all the English language versions of its publications, including the English text of the SI Brochure (the definitive international reference on the SI), with the comma (on the line) remaining the decimal marker in all of its French language publications,
- however, some international bodies use the comma on the line as the decimal marker in their English language documents,

- furthermore, some international bodies, including some international standards organizations, specify the decimal marker to be the comma on the line in all languages,
- the prescription of the comma on the line as the decimal marker is in many languages in conflict with the customary usage of the point on the line as the decimal marker in those languages,
- in some languages that are native to more than one country, either the point on the line or the comma on the line is used as the decimal marker depending on the country, while in some countries with more than one native language, either the point on the line or comma on the line is used depending on the language,

**declares** that the symbol for the decimal marker shall be either the point on the line or the comma on the line,

**reaffirms** that “Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups”, as stated in Resolution 7 of the 9th CGPM, 1948.

## CIPM, 2005

### ■ Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature (PV, 73, 235 and *Metrologia*, 2006, 43, 177-178)\*

\* The kelvin was redefined by the 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197).

#### Recommendation 2

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

#### considering

- that the kelvin, unit of thermodynamic temperature, is defined as the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water,
- that the temperature of the triple point depends on the relative amount of isotopes of hydrogen and oxygen present in the sample of water used,
- that this effect is now one of the major sources of the observed variability between different realizations of the water triple point,

#### decides

- that the definition of the kelvin refer to water of a specified isotopic composition,
- that this composition be:  
0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ ,  
0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ , and  
0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ,

which is the composition of the International Atomic Energy Agency reference material Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), as recommended by IUPAC in “Atomic Weights of the Elements: Review 2000”.

- that this composition be stated in a note attached to the definition of the kelvin in the SI brochure as follows:

“This definition refers to water having the isotopic composition defined exactly by the following amount of substance ratios: 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ , 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$  and 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ”.

■ **Revision of the *Mise en pratique* list of recommended radiations** (PV, 73, 236 and *Metrologia*, 2006, 43, 178)

**Recommendation 3**

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

**considering** that:

- improved frequency values for radiations of some high-stability cold ion and cold atom standards already documented in the recommended radiations list have recently become available;
- improved frequency values for the infra-red gas-cell-based optical frequency standard in the optical telecommunications region, already documented in the recommended radiations list, have been determined;
- improved frequency values for certain iodine gas-cell standard, already documented in the subsidiary recommended source list, have been determined;
- frequencies of new cold atoms, of atoms in the near-infrared region and of molecules in the optical telecommunications region have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;

**decides** that the list of *recommended radiations* be revised to include the following:

- updated frequency values for the single trapped  $^{88}\text{Sr}^+$  ion quadrupole transition, the single trapped  $^{199}\text{Hg}^+$  quadrupole transition and the single trapped  $^{171}\text{Yb}^+$  quadrupole transition;
- an updated frequency value for the Ca atom transition;
- an updated frequency value for the  $\text{C}_2\text{H}_2$ -stabilized standard at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- an updated frequency value for the  $\text{I}_2$ -stabilized standard at 515 nm;
- the addition of the  $^{87}\text{Sr}$  atom transition at 698 nm;
- the addition of the  $^{87}\text{Rb}$  atom two-photon transitions at 760 nm;
- the addition of the  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) band and the  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) and ( $\nu_1 + \nu_3 + \nu_4 + \nu_5$ ) bands at 1.54  $\mu\text{m}$ .

**CIPM, 2006**

■ **Concerning secondary representations of the second** (PV, 74, 249 and *Metrologia*, 2007, 44, 97)

**Recommendation 1**

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

**considering** that

- a common list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second” shall be established,
- the CCL/CCTF Joint Working Group (JWG) on the *Mise en Pratique* of the Definition of the Metre and the Secondary Representations of the Second in its meeting at the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) in September 2005 discussed possible candidates to be included in this list for secondary representations of the second,
- the CCL/CCTF JWG reviewed and updated the values for the Hg ion, Sr ion, Yb ion, and the Sr neutral atom transition frequencies in its session in September 2006,
- the CCTF in its Recommendation CCTF 1 (2004) already recommended the unperturbed ground-state hyperfine quantum transition frequency of  $^{87}\text{Rb}$  as a secondary representation of the second;

**recommends** that the following transition frequencies shall be used as secondary representations of the second and be included into the new list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second”

- the unperturbed ground-state hyperfine quantum transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of  $\nu_{\text{Rb}}^{87} = 6\,834\,682\,610.904\,324\text{ Hz}$  and an estimated relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $5s\ ^2\text{S}_{1/2} - 4d\ ^2\text{D}_{5/2}$  transition of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Sr}^+}^{88} = 444\,779\,044\,095\,484\text{ Hz}$  and a relative uncertainty of  $7 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $5d^{10}\ 6s\ ^2\text{S}_{1/2} (F=0) - 5d^9\ 6s^2\ ^2\text{D}_{5/2} (F=2)$  transition of the  $^{199}\text{Hg}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Hg}^+}^{199} = 1\,064\,721\,609\,899\,145\text{ Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical  $6s\ ^2\text{S}_{1/2} (F=0) - 5d\ ^2\text{D}_{3/2} (F=2)$  transition of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $\nu_{\text{Yb}^+}^{171} = 688\,358\,979\,309\,308\text{ Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $9 \times 10^{-15}$ ,
- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1\text{S}_0 - 5s\ 5p\ ^3\text{P}_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $\nu_{\text{Sr}}^{87} = 429\,228\,004\,229\,877\text{ Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $1.5 \times 10^{-14}$ .

## CIPM, 2007

### ■ Revision of the Mise en pratique list of recommended radiations (PV, 75, 185)

#### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures,

considering that:

- improved frequency values of molecules in the optical telecommunications region, already documented in the list of standard frequencies, have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements;
- frequencies of molecules in the optical telecommunications region have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;
- frequencies of certain iodine gas-cell absorptions close to the 532 nm optical frequency standard have been determined by femtosecond comb-based frequency measurements for the first time;

proposes that the list of standard frequencies be revised to include the following:

- an updated list of frequency values for the  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  ( $\nu_1 + \nu_3$ ) band at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- the addition of frequency values for the  $^{12}\text{C}_2\text{HD}$  ( $2\nu_1$ ) band at 1.54  $\mu\text{m}$ ;
- the addition of frequency values for the hyperfine components of the P(142) 37-0, R(121) 35-0 and R(85) 33-0 iodine transitions at 532 nm.

## 23rd CGPM, 2007

### ■ On the revision of the mise en pratique of the definition of the metre and the development of new optical frequency standards (CR, 431)

#### Resolution 9

The 23rd General Conference,

considering that:

- there have been rapid and important improvements in the performance of optical frequency standards,
- femtosecond comb techniques are now used routinely for relating optical and microwave radiations at a single location,
- National Metrology Institutes (NMIs) are working on comparison techniques for optical frequency standards over short distances,
- remote comparison techniques need to be developed at an international level so that optical frequency standards can be compared,

**welcomes**

- the activities of the Joint Working Group of the Consultative Committee for Length and the Consultative Committee for Time and Frequency to review the frequencies of optically-based representations of the second,
- the additions to the *mise en pratique* of the definition of the metre and to the list of recommended radiations made by the International Committee in 2002, 2003, 2005, 2006, and 2007,
- the initiative taken by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) to raise the issue of how to compare optical frequency standards,

**recommends that:**

- NMIs commit resources to the development of optical frequency standards and their comparison,
- the BIPM works toward the coordination of an international project with the participation of NMIs, oriented to the study of the techniques which could serve to compare optical frequency standards.

**■ Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature**  
(CR, 432)

The kelvin was redefined  
by the 26th CGPM in 2018  
(Resolution 1, see p. 197).

**Resolution 10**

The 23rd General Conference,

**considering**

- that the kelvin, unit of thermodynamic temperature, is defined as the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water,
- that the temperature of the triple point depends on the relative amount of isotopes of hydrogen and oxygen present in the sample of water used,
- that this effect is now one of the major sources of the observed variability between different realizations of the water triple point,

**notes and welcomes** the decision by the International Committee for Weights and Measures in October 2005, on the advice of the Consultative Committee for Thermometry, that

- the definition of the kelvin refers to water of a specified isotopic composition,
- this composition be:
  - 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ ,
  - 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ , and
  - 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ,

which is the composition of the International Atomic Energy Agency reference material Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), as recommended by the International Union of Pure and Applied Chemistry in "Atomic Weights of the Elements: Review 2000",

- this composition be stated in a note attached to the definition of the kelvin in the SI Brochure as follows:

"This definition refers to water having the isotopic composition defined by the following amount-of-substance ratios: 0.000 155 76 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ , 0.000 379 9 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$  and 0.002 005 2 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ".

## ■ On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI) (CR, 434)

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

### Resolution 12

The 23rd General Conference,

#### considering

- that, for many years, National Metrology Institutes (NMIs) as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) have made considerable efforts to advance and improve the International System of Units (SI) by extending the frontiers of metrology so that the SI base units could be defined in terms of the invariants of nature - the fundamental physical constants,
- that, of the seven base units of the SI, only the kilogram is still defined in terms of a material artefact - the international prototype of the kilogram (2nd CGPM, 1889, 3rd CGPM, 1901) and that the definitions of the ampere, mole and candela depend on the kilogram,
- Resolution 7 of the 21st General Conference (1999) which recommended that "national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram",
- the many advances, made in recent years, in experiments which relate the mass of the international prototype to the Planck constant  $h$  or the Avogadro constant  $N_A$ ,
- initiatives to determine the value of a number of relevant fundamental constants, including work to redetermine the Boltzmann constant  $k_B$ ,
- that as a result of recent advances, there are significant implications for, and potential benefits from, redefinitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole,
- Recommendation 1 of the International Committee (C1-2005) at its meeting in October 2005, and various Recommendations of Consultative Committees on the subject of a redefinition of one or more of the base units of the SI,

#### noting

- that any changes in definitions of units of the SI must be constrained by self-consistency,
- that it is desirable that definitions of the base units should be easily understood,
- the work of the International Committee and the Consultative Committees,
- the need to monitor the results of relevant experiments,
- the importance of soliciting comments and contributions from the wider scientific and user communities, and
- the decision of the International Committee in 2005 to approve, in principle, the preparation of new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and the possibility of redefining the mole,

**recommends** that National Metrology Institutes and the BIPM

- pursue the relevant experiments so that the International Committee can come to a view on whether it may be possible to redefine the kilogram, the ampere, the kelvin, and the mole using fixed values of the fundamental constants at the time of the 24th General Conference (2011),
- should, together with the International Committee, its Consultative Committees, and appropriate working groups, work on practical ways of realizing any new definitions based on fixed values of the fundamental constants, prepare a *mise en pratique* for each of them, and consider the most appropriate way of explaining the new definitions to users,
- initiate awareness campaigns to alert user communities to the possibility of redefinitions and that the technical and legislative implications of such redefinitions and their practical realizations be carefully discussed and considered,

**and requests** the International Committee to report on these issues to the 24th General Conference in 2011 and to undertake whatever preparations are considered necessary so that, if the results of experiments are found to be satisfactory and the needs of users met, formal proposals for changes in the definitions of the kilogram, ampere, the kelvin and mole can be put to the 24th General Conference.

**CIPM, 2009****■ Updates to the list of standard frequencies (PV, 77, 235)****Recommendation 2**

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

**considering** that

- a common list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second” has been established;
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (FSWG) has reviewed several promising candidates for inclusion in the list;

**recommends**

that the following transition frequencies shall be included or updated in the list of recommended standard frequencies:

- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.7\ \text{Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s\ 5p\ ^3P_0$  of the  $^{88}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f = 429\ 228\ 066\ 418\ 012\ \text{Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of  $f = 411\ 042\ 129\ 776\ 393\ \text{Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $4 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $^2S_{1/2} (F = 0) - ^2F_{7/2} (F = 3, m_F = 0)$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f = 642\ 121\ 496\ 772\ 657\ \text{Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 (F = 1/2) - 6s\ 6p\ ^3P_0 (F = 1/2)$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of  $f = 518\ 295\ 836\ 590\ 864\ \text{Hz}$  and a relative standard uncertainty of  $1.6 \times 10^{-13}$ .

**24th CGPM, 2011****■ On the possible future revision of the International System of Units, the SI (CR, 532)****Resolution 1**

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 24th meeting,

**considering**

- the international consensus on the importance, value, and potential benefits of a redefinition of a number of units of the International System of Units (SI),
- that the national metrology institutes (NMIs) as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) have rightfully expended significant effort during the last several decades to advance the International System of Units (SI) by extending the frontiers of metrology so that SI base units can be defined in terms of the invariants of nature - the fundamental physical constants or properties of atoms,
- that a prominent example of the success of such efforts is the current definition of the SI unit of length, the metre (17th meeting of the CGPM, 1983, Resolution 1), which links it to an exact value of the speed of light in vacuum  $c$ , namely, 299 792 458 metre per second,
- that of the seven base units of the SI, only the kilogram is still defined in terms of a material artefact, namely, the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901), and that the definitions of the ampere, mole and candela depend on the kilogram,
- that although the international prototype has served science and technology well since it was sanctioned by the CGPM at its 1st meeting in 1889, it has a number of important limitations, one of the most significant being that its mass is not explicitly linked to an invariant of nature and in consequence its long-term stability is not assured,

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

- that the CGPM at its 21st meeting in 1999 adopted Resolution 7 in which it recommended that "national laboratories continue their efforts to refine experiments that link the unit of mass to fundamental or atomic constants with a view to a future redefinition of the kilogram",
- that many advances have been made in recent years in relating the mass of the international prototype to the Planck constant  $h$ , by methods which include watt balances and measurements of the mass of a silicon atom,
- that the uncertainties of all SI electrical units realized directly or indirectly by means of the Josephson and quantum Hall effects together with the SI values of the Josephson and von Klitzing constants  $K_J$  and  $R_K$  could be significantly reduced if the kilogram were redefined so as to be linked to an exact numerical value of  $h$ , and if the ampere were to be redefined so as to be linked to an exact numerical value of the elementary charge  $e$ ,
- that the kelvin is currently defined in terms of an intrinsic property of water that, while being an invariant of nature, in practice depends on the purity and isotopic composition of the water used,
- that it is possible to redefine the kelvin so that it is linked to an exact numerical value of the Boltzmann constant  $k$ ,
- that it is also possible to redefine the mole so that it is linked to an exact numerical value of the Avogadro constant  $N_A$ , and is thus no longer dependent on the definition of the kilogram even when the kilogram is defined so that it is linked to an exact numerical value of  $h$ , thereby emphasizing the distinction between amount of substance and mass,
- that the uncertainties of the values of many other important fundamental constants and energy conversion factors would be eliminated or greatly reduced if  $h$ ,  $e$ ,  $k$  and  $N_A$  had exact numerical values when expressed in SI units,
- that the General Conference, at its 23rd meeting in 2007, adopted Resolution 12 in which it outlined the work that should be carried out by the NMIs, the BIPM and the International Committee for Weights and Measures (CIPM) together with its Consultative Committees (CCs) so that new definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole in terms of fundamental constants could be adopted,
- that, although this work has progressed well, not all the requirements set out in Resolution 12 adopted by the General Conference at its 23rd meeting in 2007 have been satisfied and so the International Committee for Weights and Measures is not yet ready to make a final proposal,
- that, nevertheless, a clear and detailed explanation of what is likely to be proposed can now be presented,

**takes note** of the intention of the International Committee for Weights and Measures to propose a revision of the SI as follows:

- the International System of Units, the SI, will be the system of units in which:
  - the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom  $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$  is exactly 9 192 631 770 hertz,
  - the speed of light in vacuum  $c$  is exactly 299 792 458 metre per second,
  - the Planck constant  $h$  is exactly  $6.626\,06\text{X} \times 10^{-34}$  joule second\*,
  - the elementary charge  $e$  is exactly  $1.602\,17\text{X} \times 10^{-19}$  coulomb,
  - the Boltzmann constant  $k$  is exactly  $1.380\,6\text{X} \times 10^{-23}$  joule per kelvin,
  - the Avogadro constant  $N_A$  is exactly  $6.022\,14\text{X} \times 10^{23}$  reciprocal mole,
  - the luminous efficacy  $K_{\text{cd}}$  of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz is exactly 683 lumen per watt,

where

(i) the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{s A}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$ ,

\* The X digit appearing in the expression of the constants indicates that this digit was unknown at the time of the resolution.



(ii) the symbol X in this Draft Resolution represents one or more additional digits to be added to the numerical values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ , using values based on the most recent CODATA adjustment,

from which it follows that the SI will continue to have the present set of seven base units, in particular

- the kilogram will continue to be the unit of mass, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Planck constant to be equal to exactly  $6.626\,06X \times 10^{-34}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$ , which is equal to J s,
- the ampere will continue to be the unit of electric current, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the elementary charge to be equal to exactly  $1.602\,17X \times 10^{-19}$  when it is expressed in the SI unit s A, which is equal to C,
- the kelvin will continue to be the unit of thermodynamic temperature, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Boltzmann constant to be equal to exactly  $1.380\,6X \times 10^{-23}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ , which is equal to  $\text{J K}^{-1}$ ,
- the mole will continue to be the unit of amount of substance of a specified elementary entity, which may be an atom, molecule, ion, electron, any other particle or a specified group of such particles, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Avogadro constant to be equal to exactly  $6.022\,14X \times 10^{23}$  when it is expressed in the SI unit  $\text{mol}^{-1}$ .

The General Conference on Weights and Measures

**further notes** that since

- the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole are intended to be of the explicit-constant type, that is, a definition in which the unit is defined indirectly by specifying explicitly an exact value for a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the metre is linked to an exact value of the speed of light in vacuum, which is also a well-recognized fundamental constant,
- the existing definition of the second is linked to an exact value of a well-defined property of the caesium atom, which is also an invariant of nature,
- although the existing definition of the candela is not linked to a fundamental constant, it may be viewed as being linked to an exact value of an invariant of nature,
- it would enhance the understandability of the International System if all of its base units were of similar wording,

the International Committee for Weights and Measures will also propose

the reformulation of the existing definitions of the second, metre and candela in completely equivalent forms, which might be the following:

- the second, symbol s, is the unit of time; its magnitude is set by fixing the numerical value of the ground state hyperfine splitting frequency of the caesium 133 atom, at rest and at a temperature of 0 K, to be equal to exactly 9 192 631 770 when it is expressed in the SI unit  $\text{s}^{-1}$ , which is equal to Hz,
- the metre, symbol m, is the unit of length; its magnitude is set by fixing the numerical value of the speed of light in vacuum to be equal to exactly 299 792 458 when it is expressed in the SI unit  $\text{m s}^{-1}$ ,
- the candela, symbol cd, is the unit of luminous intensity in a given direction; its magnitude is set by fixing the numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz to be equal to exactly 683 when it is expressed in the SI unit  $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{cd sr}$ , or  $\text{cd sr W}^{-1}$ , which is equal to  $\text{lm W}^{-1}$ .

In this way, the definitions of all seven base units will be seen to follow naturally from the set of seven constants given above.

In consequence, on the date chosen for the implementation of the revision of the SI:

- the definition of the kilogram in force since 1889 based upon the mass of the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) will be abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM, 1948) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) will be abrogated,
- the conventional values of the Josephson constant  $K_{J-90}$  and of the von Klitzing constant  $R_{K-90}$  adopted by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, will be abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, 1967/68, Resolution 4) based upon a less explicit, earlier definition (10th meeting of the CGPM, 1954, Resolution 3) will be abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, 1971, Resolution 3) based upon a definition whereby the molar mass of carbon 12 had the exact value  $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$  will be abrogated,
- the existing definitions of the metre, second and candela in force since they were adopted by the CGPM at its 17th (1983, Resolution 1), 13th (1967/68, Resolution 1) and 16th (1979, Resolution 3) meetings, respectively, will be abrogated.

The General Conference on Weights and Measures

**further notes** that on the same date

- the mass of the international prototype of the kilogram  $m(K)$  will be 1 kg but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $h$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the magnetic constant (permeability of vacuum)  $\mu_0$  will be  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$  but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant  $\alpha$  and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the thermodynamic temperature of the triple point of water  $T_{TPW}$  will be 273.16 K but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $k$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally,
- that the molar mass of carbon 12  $M(^{12}\text{C})$  will be  $0.012 \text{ kg mol}^{-1}$  but with a relative uncertainty equal to that of the recommended value of  $N_A h$  just before redefinition and that subsequently its value will be determined experimentally.

The General Conference on Weights and Measures

**encourages**

- researchers in national metrology institutes, the BIPM and academic institutions to continue their efforts and make known to the scientific community in general and to CODATA in particular, the outcome of their work relevant to the determination of the constants  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ , and
- the BIPM to continue its work on relating the traceability of the prototypes it maintains to the international prototype of the kilogram, and in developing a pool of reference standards to facilitate the dissemination of the unit of mass when redefined,

**invites**

- CODATA to continue to provide adjusted values of the fundamental physical constants based on all relevant information available and to make the results known to the International Committee through its Consultative Committee for Units since these CODATA values and uncertainties will be those used for the revised SI,

- the CIPM to make a proposal for the revision of the SI as soon as the recommendations of Resolution 12 of the 23rd meeting of the General Conference are fulfilled, in particular the preparation of *mises en pratique* for the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin and mole,
- the CIPM to continue its work towards improved formulations for the definitions of the SI base units in terms of fundamental constants, having as far as possible a more easily understandable description for users in general, consistent with scientific rigour and clarity,
- the CIPM, the Consultative Committees, the BIPM, the OIML and National Metrology Institutes significantly to increase their efforts to initiate awareness campaigns aimed at alerting user communities and the general public to the intention to redefine various units of the SI and to encourage consideration of the practical, technical, and legislative implications of such redefinitions, so that comments and contributions can be solicited from the wider scientific and user communities.

### ■ On the revision of the *mise en pratique* of the metre and the development of new optical frequency standards (CR, 546)

#### Resolution 8

The General Conference on Weight and Measures (CGPM), at its 24th meeting,

#### considering that

- there have been rapid and important improvements in the performance of optical frequency standards,
- national metrology institutes are working on comparison techniques for optical frequency standards over short distances,
- remote comparison techniques need to be developed at an international level so that optical frequency standards can be compared,

#### welcomes

- the activities of the joint working group of the CCTF and the CCL to review the frequencies of optically-based representations of the second,
- the additions made by the CIPM in 2009 to the common list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second",
- the establishment of a CCTF working group on Coordination of the Development of Advanced Time and Frequency Transfer Techniques,

#### recommends that

- NMIs commit resources to the development of optical frequency standards and their comparison,
- the BIPM supports the coordination of an international project with the participation of NMIs, oriented to the study of the techniques which could serve to compare optical frequency standards.

### CIPM, 2013

### ■ Updates to the list of standard frequencies (PV, 81, 144)

#### Recommendation 1

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

#### considering that

- a common list of "Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second" has been established,
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (FSWG) has reviewed several candidates for inclusion into the list,

**recommends** the following changes to the list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second”:

- that the following transition frequency be added to the list:
  - the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  of the  $^{199}\text{Hg}$  neutral atom with a frequency of 1 128 575 290 808 162 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.7 \times 10^{-14}$ ;
- that the following transition frequencies be updated in the list:
  - the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of 411 042 129 776 395 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.5 \times 10^{-14}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $1S - 2S$  of the  $^1\text{H}$  neutral atom with a frequency of 1 233 030 706 593 518 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.2 \times 10^{-14}$ ;

Note: This frequency corresponds to half of the energy difference between the 1S and 2S states;

- that the following transition frequencies be updated in the list and endorsed as secondary representations of the second:
  - the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f\ ^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion (octupole) with a frequency of 642 121 496 772 645.6 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s\ 6p\ ^3P_0$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of 518 295 836 590 865.0 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $2.7 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequency be added to the list and as a secondary representation of the second:
  - the unperturbed optical transition  $3s^2\ ^1S_0 - 3s\ 3p\ ^3P_0$  of the  $^{27}\text{Al}^+$  ion with a frequency of 1 121 015 393 207 857.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.9 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequencies be updated in the list and as secondary representations of the second:
  - the unperturbed optical transition  $5d\ ^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d\ ^96s^2\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{199}\text{Hg}^+$  ion with a frequency of 1 064 721 609 899 145.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.9 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion (quadrupole) with a frequency of 688 358 979 309 307.1 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of 444 779 044 095 485.3 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $4.0 \times 10^{-15}$ ;
  - the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of 429 228 004 229 873.4 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-15}$ ;
- that the following transition frequency be updated as a secondary representation of the second:
  - the unperturbed ground - state hyperfine transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of 6 834 682 610.904 312 Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-15}$ .

Note: The value of the estimated standard uncertainty is assumed to correspond to a confidence level of 68 %. However, given the very limited number of available data there is a possibility that in hindsight this might not prove to be exact.

## 25th CGPM, 2014

■ **On the future revision of the International System of Units, the SI** (CR, 416 and *Metrologia*, 2015, **52**, 155)

The 26th CGPM in 2018 (Resolution 1, see p. 197) finally approved the revision of the SI.

**Resolution 1**

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 25th meeting,

**recalling**

- Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011), which takes note of the intention of the International Committee for Weights and Measures (CIPM) to propose a revision of the SI that links the definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole to exact numerical values of the Planck constant  $h$ , elementary charge  $e$ , Boltzmann constant  $k$ , and Avogadro constant  $N_A$ , respectively, and which revises the way the SI is defined including the wording of the definitions of the SI units for time, length, mass, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance, and luminous intensity so that the reference constants on which the SI is based are clearly apparent,
- the many benefits summarized in Resolution 1 that will accrue to science, technology, industry, and commerce from such a revision, especially from linking the kilogram to an invariant of nature rather than to the mass of a material artefact, thereby ensuring its long-term stability,
- Resolution 7 adopted by the CGPM at its 21st meeting (1999), which encourages work at the National Metrology Institutes (NMIs) that can lead to such a redefinition of the kilogram,
- Resolution 12 adopted by the CGPM at its 23rd meeting (2007), which outlines the work that should be carried out by the NMIs, the International Bureau of Weights and Measures (BIPM), and the CIPM together with its Consultative Committees (CCs) that could enable the planned revision of the SI to be adopted by the CGPM,

**considering that** there has been significant progress in completing the necessary work, including

- the acquisition of relevant data and their analysis by the Committee on Data for Science and Technology (CODATA) to obtain the required values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ ,
- establishment by the BIPM of an ensemble of reference standards of mass to facilitate the dissemination of the unit of mass in the revised SI,
- the preparation of mises-en-pratique for the new definitions of the kilogram, ampere, kelvin, and mole,

**noting that** further work by the Consultative Committee for Units (CCU), the CIPM, the BIPM, the NMIs and the CCs should focus on

- awareness campaigns to alert user communities as well as the general public to the proposed revision of the SI,
- the preparation of the 9th edition of the SI Brochure that presents the revised SI in a way that can be understood by a diverse readership without compromising scientific rigour,

**that** despite this progress the data do not yet appear to be sufficiently robust for the CGPM to adopt the revised SI at its 25th meeting,

**encourages**

- continued effort in the NMIs, the BIPM, and academic institutions to obtain data relevant to the determination of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$  with the requisite uncertainties,
- the NMIs to continue acting through the CCs to discuss and review this data,
- the CIPM to continue developing a plan to provide the path via the Consultative Committees and the CCU for implementing Resolution 1 adopted by the CGPM at its 24th meeting (2011), and
- continued effort by the CIPM, together with its Consultative Committees, the NMIs, the BIPM, and other organizations such as the International Organization of Legal Metrology (OIML), to complete all work necessary for the CGPM at its 26th meeting to adopt a resolution that would replace the current SI with the revised SI, provided the amount of data, their uncertainties, and level of consistency are deemed satisfactory.

## CIPM, 2015

## ■ Updates to the list of standard frequencies (PV, 83, 207)

## Recommendation 2

Further updates are available on the BIPM website.

The International Committee for Weights and Measures (CIPM),

## considering

- a common list of “Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second” has been established,
- the CCL-CCTF Frequency Standards Working Group (WGFS) has reviewed several candidates for updating the list,

## recommends

that the following transition frequencies shall be updated in the list of recommended values of standard frequencies:

- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$  of the  $^{199}\text{Hg}$  neutral atom with a frequency of  $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154.8$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$ ;
- the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2} - 4f^{13}\ 6s^2\ ^2F_{7/2}$  of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f_{171\text{Yb}^+}$  (octupole) =  $642\ 121\ 496\ 772\ 645.0$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $6s\ ^2S_{1/2}$  ( $F = 0, m_F = 0$ ) –  $5d\ ^2D_{3/2}$  ( $F = 2, m_F = 0$ ) of the  $^{171}\text{Yb}^+$  ion with a frequency of  $f_{171\text{Yb}^+}$  (quadrupole) =  $688\ 358\ 979\ 309\ 308.3$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{88}\text{Sr}^+$  ion with a frequency of  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486.6$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.6 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$  of the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion with a frequency of  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398.4$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $1.2 \times 10^{-14}$ ;
- the unperturbed optical transition  $1S - 2S$  of the  $^1\text{H}$  neutral atom with a frequency of  $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $9 \times 10^{-15}$ .

Note: This frequency corresponds to half of the energy difference between the 1S and 2S states;

- the unperturbed optical transition  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  of the  $^{87}\text{Sr}$  neutral atom with a frequency of  $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873.2$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $5 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed optical transition  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$  of the  $^{171}\text{Yb}$  neutral atom with a frequency of  $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864.0$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $2 \times 10^{-15}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second);
- the unperturbed ground-state hyperfine transition of  $^{87}\text{Rb}$  with a frequency of  $f_{87\text{Rb}} = 6\ 834\ 682\ 610.904\ 310$  Hz and an estimated relative standard uncertainty of  $7 \times 10^{-16}$  (this radiation is already endorsed by the CIPM as a secondary representation of the second).

and also recommends

that the following transition frequencies shall be included in the list of recommended values of standard frequencies:

- Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , saturated absorption  $a_1$  component, R(36) 32-0 transition.

$$\begin{aligned} \text{The values} \quad f_{a1} &= 564\ 074\ 632.42 \text{ MHz} \\ \lambda_{a1} &= 531\ 476\ 582.65 \text{ fm} \end{aligned}$$

with an estimated relative standard uncertainty of  $1 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a frequency-doubled diode DFB laser, stabilized with an iodine cell external to the laser.

- Absorbing atom  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} - 5P_{3/2}$  crossover between the d and f hyperfine components of the saturated absorption at 780 nm (D2 transition)

The values  $f_{d/f \text{ crossover}} = 384\,227\,981.9 \text{ MHz}$

$\lambda_{d/f \text{ crossover}} = 780\,246\,291.6 \text{ nm}$

with an estimated relative standard uncertainty of  $5 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a tunable External Cavity Diode Laser, stabilized to the d/f crossover in a rubidium cell external to the laser.

Note: The value of the standard uncertainty is assumed to correspond to a confidence level of 68 %. However, given the limited availability of data there is a possibility that in hindsight this might not prove to be exact

## CIPM, 2017

### ■ On progress towards the possible redefinition of the SI (PV, 85, 101)

#### Decision 10

The International Committee for Weights and Measures (CIPM) welcomed recommendations regarding the redefinition of the SI from its Consultative Committees.

The CIPM noted that the agreed conditions for the redefinition are now met and decided to submit draft Resolution A to the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) and to undertake all other necessary steps to proceed with the planned redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole.

## 26th CGPM, 2018

### ■ On the revision of the International System of Units, the SI (CR, in press and *Metrologia*, 2019, **56**, 022001)

#### Resolution 1

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 26th meeting,

#### considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was described in Resolution 1 of the 24<sup>th</sup> General Conference in 2011, adopted unanimously, that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the 24<sup>th</sup> General Conference, confirmed by the 25<sup>th</sup> General Conference, before such a revised SI could be adopted have now been met,

#### decides

that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  is 9 192 631 770 Hz,
- the speed of light in vacuum  $c$  is 299 792 458 m/s,
- the Planck constant  $h$  is  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ,
- the elementary charge  $e$  is  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,

- the Boltzmann constant  $k$  is  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  J/K,
- the Avogadro constant  $N_A$  is  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>,
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{cd}$ , is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to  $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ,  $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ,  $\text{C} = \text{A s}$ ,  $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$ , and  $\text{W} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$ .

In making this decision, the General Conference notes the consequences as set out in Resolution 1 of the 24<sup>th</sup> General Conference in respect to the base units of the SI and confirms these in the following Appendices to this Resolution, which have the same force as the Resolution itself.

The General Conference invites the International Committee to produce a new edition of its Brochure *The International System of Units, SI* in which a full description of the SI is given.

### Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units:

It follows from the new definition of the SI adopted above that

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1), is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant  $K_{J-90}$  and of the von Klitzing constant  $R_{K-90}$  taken by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.

### Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions:

It follows from the new definition of the SI adopted above, and from the recommended values of the 2017 special CODATA adjustment on which the values of the defining constants are based, that at the time this Resolution was adopted

- the mass of the international prototype of the kilogram  $m(K)$  is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of  $h$  at the time this Resolution was adopted, namely  $1.0 \times 10^{-8}$  and that in the future its value will be determined experimentally,
- the vacuum magnetic permeability  $\mu_0$  is equal to  $4\pi \times 10^{-7}$  H m<sup>-1</sup> within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant  $\alpha$  at the time this Resolution was adopted, namely  $2.3 \times 10^{-10}$  and that in the future its value will be determined experimentally,



- the thermodynamic temperature of the triple point of water  $T_{\text{TPW}}$  is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of  $k$  at the time this Resolution was adopted, namely  $3.7 \times 10^{-7}$ , and that in the future its value will be determined experimentally,
- the molar mass of carbon 12,  $M(^{12}\text{C})$ , is equal to 0.012 kg mol<sup>-1</sup> within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of  $N_{\text{A}}h$  at the time this Resolution was adopted, namely  $4.5 \times 10^{-10}$ , and that in the future its value will be determined experimentally.

### Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the definition of the SI adopted above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s<sup>-1</sup>.
- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum  $c$  to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of the caesium frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J s, which is equal to kg m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge  $e$  to be  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant  $k$  to be  $1.380\,649 \times 10^{-23}$  when expressed in the unit J K<sup>-1</sup>, which is equal to kg m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>, where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant,  $N_{\text{A}}$ , when expressed in the unit mol<sup>-1</sup> and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol  $n$ , of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , to be 683 when expressed in the unit lm W<sup>-1</sup>, which is equal to cd sr W<sup>-1</sup>, or cd sr kg<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>3</sup>, where the kilogram, metre and second are defined in terms of  $h$ ,  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

## **Appendix 2. Practical realization of the definitions of some important units**

Appendix 2 is published in electronic form only, and is available on the BIPM website ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

## **Appendix 3. Units for photochemical and photobiological quantities**

Appendix 3 is published in electronic form only, and is available on the BIPM website ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)).

## Appendix 4. Historical notes on the development of the International System of Units and its base units

### Part 1. The historical development of the realization of SI units

Experimental methods used for the realization of units and which use equations of physics are known as primary methods. The essential characteristic of a primary method is that it allows a quantity to be measured in a particular unit directly from its definition by using only quantities and constants that themselves do not contain that unit.

Traditionally, a unit for a given quantity was taken to be a particular example of that quantity, which was chosen to provide numerical values of common measurements of a convenient size. Before the rise of modern science, units were necessarily defined in terms of material artefacts, notably the metre and kilogram for length and mass, or the property of a particular object, namely the rotation of the earth for the second. Even at the origin of the metric system at the end of the 18th century it was recognized that a more desirable definition of a unit of length for example would be one based on a universal property of nature such as the length of a pendulum beating seconds. Such a definition would be independent of time and place and would in principle accessible all over the world. At the time, practical considerations resulted in the simpler, artefact definitions for the metre and the kilogram and the second remained linked to the rotation of the Earth. It was only in 1960 that the first non-material definition was adopted, namely the wavelength of a specified optical radiation for the metre.

Since then, definitions of the ampere, kelvin, mole and candela have been adopted that do not refer to material artefacts. In the case of the ampere it refers to a specified electric current required to produce a given electromagnetic force and, in the case of the kelvin, to a particular thermodynamic state, namely the triple point of water. Even the atomic definition of the second was in terms of a specified transition of the caesium atom. The kilogram has always stood out as the one unit that had resisted the transformation from an artefact. The definition that opened the way to real universality was that of the metre in 1983. This definition implied, although it did not state, a fixed numerical value for the speed of light. The definition was worded, however, in the traditional form and stated essentially that the metre was the distance travelled by light in a specified time. In this way it reflected the other definitions of the base units of the SI each of which has the same form, for example “the ampere is the current which...” and “the kelvin is a fraction of a specified temperature”. Such definitions can be called explicit unit definitions.

Although these definitions meet many of the requirements for universality and accessibility, and a variety of realizations are often possible, they nevertheless constrain practical realizations to experiments that are directly or indirectly linked to the particular conditions or states specified in each definition. In consequence, the accuracy of realization of such definitions can never be better than the accuracy of realization of the particular conditions or states specified in the definitions.

This is a particular problem with the present definition of the second, which is based on a microwave transition of an atom of caesium. Frequencies of optical transitions of different atoms or ions are now demonstrably more reproducible, by some orders of magnitude, than the defined frequency of caesium.

In the present definition of the SI based on the set of defining constants, instead of each definition specifying a particular condition or state, which sets a fundamental limit to the accuracy of realization, any convenient equation of physics that links the particular constant or constants to the quantity we want to measure may be used. This is a much more general way of defining the basic units of measurement. It is one that is not limited by today's science or technology as future developments may lead to as yet unknown equations that could result in different ways of realizing units with a much higher accuracy. When defined in this way, there is, in principle, no limit to the accuracy with which a unit can be realized. The exception remains the definition of the second in which the original microwave transition of caesium remains, for the time being, the basis of the definition.

The difference between an explicit unit and an explicit constant definition can be clearly illustrated using the two previous definitions of the metre that depended upon a fixed numerical value of the speed of light and secondly the two definitions of the kelvin. The original 1983 definition of the metre states, in effect, that “the metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second”. The new definition simply states that the metre is defined by taking the constant that defines the second, the specified caesium frequency and the fixed numerical value of the speed of light expressed in units  $\text{m s}^{-1}$ . We can thus use any equation of physics including, of course, that indicated by the former definition, the time taken to travel the given distance which is used for astronomical distances, but also the simple equation relating frequency and wavelength to the speed of light. The former definition of the kelvin based on a fixed numerical value for the temperature of the triple point of water requires ultimately a measurement at the triple point of water. The new definition, based on the fixed numerical value for the Boltzmann constant, is much more general in that any thermodynamic equation in which  $k$  appears can in principle be used to determine a thermodynamic temperature at any point on the temperature scale. For example, by determining the total radiant exitance of a black body at temperature  $T$ , equal to  $(2\pi^5 k^4/15c^2 h^3) T^4$ , in  $\text{W m}^{-2}$  we can determine  $T$  directly.

For the kilogram, the unit whose definition has undergone the most fundamental change, realization can be through any equation of physics that links mass, the Planck constant, the velocity of light and the caesium frequency. One such equation is that which describes the operation of an electro-mechanical balance, previously known as a watt balance, more recently known as a Kibble<sup>1</sup> balance. With this apparatus, a mechanical power, measured in terms of a mass,  $m$ , the local acceleration due to gravity,  $g$ , and a velocity,  $v$ , can be measured in terms of an electrical power measured in terms of an electric current and voltage measured in terms of the quantum Hall and Josephson effects respectively. The resulting equation is  $mgv = Ch$  where  $C$  is a calibration constant that includes measured frequencies and  $h$  is Planck's constant.

Another method that can be used for a primary realization of the kilogram is through the determination of the number of atoms in a silicon sphere and using the equation:

$$m = \frac{8V}{a_0^3} \frac{2R_\infty h m_{\text{Si}}}{c \alpha^2 m_e}$$

<sup>1</sup> To recognize Bryan Kibble's invention of the watt balance

with the mass  $m$  and volume  $V$  of the sphere (about 1 kg), lattice parameter  $a_0$ , Rydberg constant  $R_\infty$ , fine structure constant  $\alpha$ , and the masses of a silicon atom (averaged over the three isotopes used for the sphere)  $m_{\text{Si}}$ , and the electron  $m_e$ , respectively. The first fraction corresponds to the number of atoms in the sphere, the second to the electron mass and the third fraction is the ratio of the mass of the (isotopically averaged) silicon atom to the electron mass.

Another possibility for measuring mass through the new definition, but this time at the microscopic level, is through measurements of atomic recoil using the relation that includes  $h/m$ .

All these provide a striking illustration of the generality of the new way of defining units. Detailed information on the current realization of the base and other units is given on the BIPM website.

## Part 2. The historical development of the International System

The 9th CGPM (1948, Resolution 6; CR 64) instructed the CIPM:

- to study the establishment of a complete set of rules for units of measurement;
- to find out for this purpose, by official enquiry, the opinion prevailing in scientific, technical and educational circles in all countries;
- to make recommendations on the establishment of a *practical system of units of measurement* suitable for adoption by all signatories to the *Metre Convention*.

The same CGPM also laid down, in Resolution 7 (CR 70), ‘general principles for the writing of unit symbols’ and listed some coherent derived units that were assigned special names.

The 10th CGPM (1954, Resolution 6; CR 80) adopted as base quantities and units for this practical system the following six quantities: length, mass, time, electric current, thermodynamic temperature and luminous intensity, as well as the six corresponding base units: metre, kilogram, second, ampere, kelvin and candela. After a lengthy discussion between physicists and chemists, the 14th CGPM (1971, Resolution 3, CR 78 and *Metrologia* 1972, 8, 36) added amount of substance, unit mole, as the seventh base quantity and unit.

The 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR 87) adopted the name *Système international d’unités*, with the international abbreviation *SI*, for this practical system of units and laid down rules for prefixes, derived units and the former supplementary units, as well as other matters; it thus established a comprehensive specification for units of measurement. Subsequent meetings of the CGPM and the CIPM have added to and modified the original structure of the SI to take account of advances in science and of the changing needs of users.

The historical sequence that led to these important decisions may be summarized as follows.

- The creation of the decimal metric system at the time of the French Revolution and the subsequent deposition of two platinum standards representing the metre and the kilogram, on 22 June 1799, in the *Archives de la République* in Paris, which can be seen as the first step that led to the present International System of Units.

- In 1832, Gauss strongly promoted the application of this metric system, together with the second defined in astronomy, as a coherent system of units for the physical sciences. Gauss was the first to make absolute measurements of the earth's magnetic field in terms of a decimal system based on the *three mechanical units* millimetre, gram and second for, respectively, the quantities length, mass and time. In later years Gauss and Weber extended these measurements to include other electrical phenomena.
- These applications in the field of electricity and magnetism were further extended in the 1860s under the active leadership of Maxwell and Thomson through the British Association for the Advancement of Science (BAAS). They formulated the requirement for a *coherent system of units* with *base units* and *derived units*. In 1874 the BAAS introduced the *CGS system*, a three-dimensional coherent unit system based on the three mechanical units centimetre, gram and second, using prefixes ranging from micro to mega to express decimal sub-multiples and multiples. The subsequent development of physics as an experimental science was largely based on this system.
- The sizes of the coherent CGS units in the fields of electricity and magnetism proved to be inconvenient, so in the 1880s the BAAS and the International Electrical Congress, predecessor of the International Electrotechnical Commission (IEC), approved a mutually coherent set of *practical units*. Among them were the ohm for electrical resistance, the volt for electromotive force, and the ampere for electric current.
- After the signing of the Metre Convention on 20 May 1875, which created the BIPM and established the CGPM and the CIPM, work began on establishing new international prototypes for the metre and the kilogram. In 1889 the 1st CGPM sanctioned the international prototypes for the metre and the kilogram. Together with the astronomical second as the unit of time, these units constituted a three-dimensional mechanical unit system similar to the CGS system, but with the base units metre, kilogram and second, known as the *MKS system*.
- In 1901 Giorgi showed that it is possible to combine the mechanical units of this MKS system with the practical electrical units to form a coherent four-dimensional system by adding to the three base units a fourth unit, of an electrical nature such as the ampere or the ohm, and also rewriting the equations occurring in electromagnetism in the so-called rationalized form. Giorgi's proposal opened the path to a number of new developments.
- After the revision of the Metre Convention by the 6th CGPM (1921), which extended the scope and responsibilities of the BIPM to other fields in physics and the subsequent creation of the Consultative Committee for Electricity (CCE) by the 7th CGPM (1927), the Giorgi proposal was thoroughly discussed by the IEC, the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and other international organizations. This led the CCE to propose in 1939 the adoption of a four-dimensional system based on the metre, kilogram, second and ampere, the MKSA system, a proposal approved by the CIPM in 1946.
- Following an international enquiry by the BIPM, which began in 1948, the 10th CGPM (1954), approved the further introduction of the kelvin and the candela, as base units for thermodynamic temperature and luminous intensity, respectively. The name International System of Units, with the abbreviation SI, was given to the

system by the 11th CGPM (1960). Rules for prefixes, derived units, the former supplementary units as well as other matters, were established, thus providing a comprehensive specification for all units of measurement.

- At the 14th CGPM (1971) a new base unit, the mole, symbol mol, was adopted for the quantity amount of substance. This followed a proposal from the International Organization for Standardization originating in a proposal from the Commission on Symbols, Units and Nomenclature (SUN Commission) of IUPAP, which was supported by the International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC). This brought the number of base units of the SI to seven.
- Since then, extraordinary advances have been made in relating SI units to truly invariant quantities such as the fundamental constants of physics and the properties of atoms. Recognizing the importance of linking SI units to such invariant quantities, the 24th CGPM (2011), adopted the principles of a new definition of the SI based on using a set of seven such constants as references for the definitions. At the time of the 24th CGPM, experiments to determine their values in terms of the then base units were not completely consistent but by the time of the 26th CGPM (2018) this had been achieved and the new definition of the SI was adopted in Resolution 1. This is the basis of the definition presented in this brochure and it is the simplest and most fundamental way of defining the SI.
- The SI was previously defined in terms of seven base units and derived units defined as products of powers of the base units. The seven base units were chosen for historical reasons, as the metric system, later the SI, evolved and developed over the last 130 years. Their choice was not unique, but it has become established and familiar over the years, not only by providing a framework for describing the SI, but also for defining the derived units. This role for the base units continues in the present SI even though the SI itself is now defined in terms of the seven defining constants. In this brochure therefore, definitions of the seven base units can still be found but are henceforth based on the seven defining constants: the caesium hyperfine frequency  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ; the speed of light in vacuum  $c$ ; the Planck constant  $h$ ; elementary charge  $e$ ; Boltzmann constant  $k$ ; Avogadro constant  $N_{\text{A}}$ ; and the luminous efficacy of a defined visible radiation  $K_{\text{cd}}$ .

The definitions of the seven base units can be related unambiguously to the numerical values of the seven defining constants. However, there is not a one-to-one relationship between the seven defining constants and the seven base units as many of the base units call upon more than one of the defining constants.

### Part 3. Historical perspective on the base units

#### Unit of time, second

Before 1960, the unit of time the second, was defined as the fraction 1/86 400 of the mean solar day. The exact definition of “mean solar day” was left to astronomers. However measurements showed that irregularities in the rotation of the Earth made this an unsatisfactory definition. In order to define the unit of time more precisely, the 11th CGPM (1960, Resolution 9, CR, 86) adopted a definition given by the International Astronomical Union based on the tropical year 1900. Experimental work, however, had already shown that an atomic standard of time, based on a transition between two energy levels of an atom or a molecule, could be realized and reproduced much more accurately. Considering that a very



precise definition of the unit of time is indispensable for science and technology, the 13th CGPM (1967-1968, Resolution 1, CR, 103 and *Metrologia*, 1968, **4**, 43) chose a new definition of the second referenced to the frequency of the ground state hyperfine transition in the caesium 133 atom. A revised more precise wording of this same definition now in terms of a fixed numerical value of the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , was adopted in Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

### Unit of length, metre

The 1889 definition of the metre, namely, the length of the international prototype of platinum-iridium, was replaced by the 11th CGPM (1960) using a definition based on the wavelength of the radiation corresponding to a particular transition in krypton 86. This change was adopted in order to improve the accuracy with which the definition of the metre could be realized, this being achieved using an interferometer with a travelling microscope to measure the optical path difference as the fringes were counted. In turn, this was replaced in 1983 by the 17th CGPM (Resolution 1, CR, 97, and *Metrologia*, 1984, **20**, 25) with a definition referenced to the distance that light travels in vacuum in a specified interval of time. The original international prototype of the metre, which was sanctioned by the 1st CGPM in 1889 (CR, 34-38), is still kept at the BIPM under conditions specified in 1889. In order to make clear its dependence on the fixed numerical value of the speed of light,  $c$ , the wording of the definition was changed in Resolution 1 of the 26<sup>th</sup> CGPM (2018).

### Unit of mass, kilogram

The 1889 definition of the kilogram was simply the mass of the international prototype of the kilogram, an artefact made of platinum-iridium. This was, and still is, kept at the BIPM under the conditions specified by the 1st CGPM (1889, CR, 34-38) when it sanctioned the prototype and declared that “this prototype shall henceforth be considered to be the unit of mass”. Forty similar prototypes were made at about the same time and these were all machined and polished to have closely the same mass as the international prototype. At the 1st CGPM (1889), after calibration against the international prototype, most of these “national prototypes” were individually assigned to Member States of the Meter Convention, and some also to the BIPM. The 3rd CGPM (1901, CR, 70), in a declaration intended to end the ambiguity in common usage concerning the use of the word “weight”, confirmed that “the kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram”. The complete version of these declarations appears on p. 70 of the above-mentioned CGPM proceedings.

By the time of the second verification of national prototypes in 1946 it was found that on average the masses of these prototypes were diverging from that of the international prototype. This was confirmed by the third verification carried out from 1989 to 1991, the median difference being about 25 micrograms for the set of original prototypes sanctioned by the 1st CGPM (1889). In order to assure the long-term stability of the unit of mass, to take full advantage of quantum electrical standards and to be of more utility to modern science, a new definition for the kilogram based on the value of a fundamental constant, for which purpose the Planck constant  $h$  was chosen, was adopted by Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

### Unit of electric current, ampere

Electric units, called “international units”, for current and resistance were introduced by the International Electrical Congress held in Chicago in 1893 and definitions of the “international ampere” and “international ohm” were confirmed by the International Conference in London in 1908.

By the time of the 8th CGPM (1933) there was a unanimous desire to replace the “international units” by so-called “absolute units”. However because some laboratories had not yet completed experiments needed to determine the ratios between the international and absolute units, the CGPM gave authority to the CIPM to decide at an appropriate time both these ratios and the date at which the new absolute units would come into effect. The CIPM did so in 1946 (1946, Resolution 2, PV, **20**, 129-137), when it decided that the new units would come into force on 1 January 1948. In October 1948 the 9th CGPM approved the decisions taken by the CIPM. The definition of the ampere, chosen by the CIPM, was referenced to the force between parallel wires carrying an electric current and it had the effect of fixing the numerical value of the vacuum magnetic permeability  $\mu_0$  (also called the magnetic constant). The numerical value of the vacuum electric permittivity  $\epsilon_0$  (also called the electric constant) then became fixed as a consequence of the new definition of the metre adopted in 1983.

However the 1948 definition of the ampere proved difficult to realize and practical quantum standards (based on Josephson and quantum-Hall effects), which link both the volt and the ohm to particular combinations of the Planck constant  $h$  and elementary charge  $e$ , became almost universally used as a practical realization of the ampere through Ohm’s law (18th CGPM (1987), Resolution 6, CR 100). As a consequence, it became natural not only to fix the numerical value of  $h$  to redefine the kilogram, but also to fix the numerical value of  $e$  to redefine the ampere in order to bring the practical quantum electrical standards into exact agreement with the SI. The present definition based on a fixed numerical value for the elementary charge,  $e$ , was adopted in Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

### Unit of thermodynamic temperature, kelvin

The definition of the unit of thermodynamic temperature was given by the 10th CGPM (1954, Resolution 3; CR 79) which selected the triple point of water,  $T_{\text{TPW}}$ , as a fundamental fixed point and assigned to it the temperature 273.16 K, thereby defining the kelvin. The 13th CGPM (1967-1968, Resolution 3; CR, 104 and *Metrologia*, 1968, **4**, 43) adopted the name kelvin, symbol K, instead of “degree kelvin”, symbol °K, for the unit defined in this way. However, the practical difficulties in realizing this definition, requiring a sample of pure water of well-defined isotopic composition and the development of new primary methods of thermometry, led to the adoption of a new definition of the kelvin based on a fixed numerical value of the Boltzmann constant  $k$ . The present definition, which removed both of these constraints, was adopted in Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

## Unit of amount of substance, mole

Following the discovery of the fundamental laws of chemistry, units called, for example, “gram-atom” and “gram molecule”, were used to specify amounts of chemical elements or compounds. These units had a direct connection with “atomic weights” and “molecular weights”, which are in fact relative atomic and molecular masses. The first compilations of “Atomic weights” were originally linked to the atomic weight of oxygen, which was, by general agreement, taken as being 16. Whereas physicists separated the isotopes in a mass spectrometer and attributed the value 16 to one of the isotopes of oxygen, chemists attributed the same value to the (slightly variable) mixture of isotopes 16, 17 and 18, which for them constituted the naturally occurring element oxygen. An agreement between the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) brought this duality to an end in 1959-1960. Physicists and chemists had agreed to assign the value 12, exactly, to the so-called atomic weight, correctly referred to as the relative atomic mass  $A_r$ , of the isotope of carbon with mass number 12 (carbon 12,  $^{12}\text{C}$ ). The unified scale thus obtained gives the relative atomic and molecular masses, also known as the atomic and molecular weights, respectively. This agreement is unaffected by the redefinition of the mole.

The quantity used by chemists to specify the amount of chemical elements or compounds is called “amount of substance”. Amount of substance, symbol  $n$ , is defined to be proportional to the number of specified elementary entities  $N$  in a sample, the proportionality constant being a universal constant which is the same for all entities. The proportionality constant is the reciprocal of the Avogadro constant  $N_A$ , so that  $n = N/N_A$ . The unit of amount of substance is called the *mole*, symbol mol. Following proposals by the IUPAP, IUPAC and ISO, the CIPM developed a definition of the mole in 1967 and confirmed it in 1969, by specifying that the molar mass of carbon 12 should be exactly 0.012 kg/mol. This allowed the amount of substance  $n_S(\text{X})$  of any pure sample  $S$  of entity  $X$  to be determined directly from the mass of the sample  $m_S$  and the molar mass  $M(\text{X})$  of entity  $X$ , the molar mass being determined from its relative atomic mass  $A_r$  (atomic or molecular weight) without the need for a precise knowledge of the Avogadro constant, by using the relations

$$n_S(\text{X}) = m_S/M(\text{X}), \text{ and } M(\text{X}) = A_r(\text{X}) \text{ g/mol}$$

Thus, this definition of the mole was dependent on the artefact definition of the kilogram.

The numerical value of the Avogadro constant defined in this way was equal to the number of atoms in 12 grams of carbon 12. However, because of recent technological advances, this number is now known with such precision that a simpler and more universal definition of the mole has become possible, namely, by specifying exactly the number of entities in one mole of any substance, thus fixing the numerical value of the Avogadro constant. This has the effect that the new definition of the mole and the value of the Avogadro constant are no longer dependent on the definition of the kilogram. The distinction between the fundamentally different quantities ‘amount of substance’ and ‘mass’ is thereby emphasized. The present definition of the mole based on a fixed numerical value for the Avogadro constant,  $N_A$ , was adopted in Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

### Unit of luminous intensity, candela

The units of luminous intensity, which were based on flame or incandescent filament standards in use in various countries before 1948, were replaced initially by the “new candle” based on the luminance of a Planckian radiator (a black body) at the temperature of freezing platinum. This modification had been prepared by the International Commission on Illumination (CIE) and by the CIPM before 1937 and the decision was promulgated by the CIPM in 1946. It was then ratified in 1948 by the 9th CGPM, which adopted a new international name for this unit, the *candela*, symbol cd; in 1954 the 10th CGPM established the candela as a base unit; In 1967 the 13th CGPM (Resolution 5, CR, 104 and *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) amended this definition.

In 1979, because of the difficulties in realizing a Planck radiator at high temperatures, and the new possibilities offered by radiometry, i.e. the measurement of optical radiation power, the 16th CGPM (1979, Resolution 3, CR, 100 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56) adopted a new definition of the candela.

The present definition of the candela uses a fixed numerical value for the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $K_{\text{cd}}$ , adopted in Resolution 1 of the 26th CGPM (2018).

# List of acronyms used in the present volume

## 1 Acronyms for laboratories, committees and conferences

BAAS	British Association for the Advancement of Science
BIPM	Bureau international des poids et mesures/ International Bureau of Weights and Measures
CARICOM	Caribbean Community
CCAUV	Comité consultatif de l'acoustique, des ultrasons et des vibrations/ Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration
CCDS	Comité consultatif pour la définition de la seconde/ Consultative Committee for the Definition of the Second, see CCTF
CCE	Comité consultatif d'électricité/ Consultative Committee for Electricity, see CCEM
CCEM	(formerly the CCE) Comité consultatif d'électricité et magnétisme/ Consultative Committee for Electricity and Magnetism
CCL	Comité consultatif des longueurs/Consultative Committee for Length
CCM	Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées/ Consultative Committee for Mass and Related Quantities
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie/ Consultative Committee for Photometry and Radiometry
CCQM	Comité consultatif pour la quantité de matière : métrologie en chimie et biologie/Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology
CCRI	Comité consultatif des rayonnements ionisants/ Consultative Committee for Ionizing Radiation
CCT	Comité consultatif de thermométrie/ Consultative Committee for Thermometry
CCTF	(formerly the CCDS) Comité consultatif du temps et des fréquences/ Consultative Committee for Time and Frequency
CCU	Comité consultatif des unités/Consultative Committee for Units
CGPM	Conférence générale des poids et mesures/ General Conference on Weights and Measures
CIPM	Comité international des poids et mesures/ International Committee for Weights and Measures
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
CR	<i>Comptes Rendus</i> of the Conférence générale des poids et mesures, CGPM
IAU	International Astronomical Union
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IEC	International Electrotechnical Commission
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry

IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
OIML	Organisation internationale de métrologie légale/International Organization of Legal Metrology
PV	<i>Procès-Verbaux</i> of the Comité international des poids et mesures, CIPM
SUNAMCO	Commission for Symbols, Units, Nomenclature, Atomic Masses and Fundamental Constants, IUPAP
WHO	World Health Organization

## 2 Acronyms for scientific terms

CGS	Three-dimensional coherent system of units based on the three mechanical units centimetre, gram and second
EPT-76	Échelle provisoire de température de 1976/Provisional Low Temperature Scale of 1976
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure/Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IPTS-68	International Practical Temperature Scale of 1968
ITS-90	International Temperature Scale of 1990
MKS	System of units based on the three mechanical units metre, kilogram, and second
MKSA	Four-dimensional system of units based on the metre, kilogram, second, and the ampere
SI	Système international d'unités/International System of Units
TAI	Temps atomique international/International Atomic Time
TCG	Temps-coordonnée géocentrique/Geocentric Coordinated Time
TT	Terrestrial Time
UTC	Coordinated Universal Time
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water

# Index

## A

acceleration due to gravity, standard value of ( $g_n$ ), 146, 159, 203  
 absolute units, 208  
 absorbed dose, 138, 140, 141, 172, 173, 174, 176, 182-183  
 activity referred to a radionuclide, 138, 168, 172  
 amount of substance, 129, 130, 134, 136, 151, 156, 204, 206, 209,  
 ampere (A), 125, 127, 130, 132, 140, 160, 162, 163, 165, 166, 179, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 195, 197, 198, 199, 202, 204, 205, 208  
 angle, 137-138, 145, 149, 151, 159, 165, 174  
 arcsecond, 145  
 astronomical unit, 145  
 atomic weight, 209  
 Avogadro constant, 127, 128, 129, 134, 188, 190, 191, 195, 198, 199, 206, 209  
 Avogadro number, 134, 199

## B

bar, 162  
 base quantity, 130, 136, 140, 204  
 base unit(s), 122, 125-126, 129, 130-135, 137-139, 153, 202, 206  
 becquerel (Bq), 138, 140, 168, 172-173  
 bel (B), 145-146  
 Boltzmann constant, 127, 128, 129, 133, 188, 190, 191, 195, 198, 199, 203, 206, 208  
 British Association for the Advancement of Science (BAAS), 205

## C

calorie, 161, 162  
 candela (cd), 125, 127, 130, 135, 141, 159, 162, 163, 165, 169-170, 173, 179, 188, 189, 190, 191, 192, 198, 199, 202, 204, 205, 210; new candle, 159, 162, 170, 173, 2010

carbon 12, 134, 146, 172, 192, 199, 209  
 caesium frequency, 129, 130, 131, 199, 203  
 Celsius temperature, 133, 138, 149  
 CGS, 161, 205  
 clinical chemistry, 134, 180  
 CODATA, 146, 191, 192, 195, 198  
 coherent derived units, 132, 137-139, 180, 204  
 continuity, 123, 128  
 Convention du Mètre, 117-119, 122, 125  
 Coordinated Universal Time (UTC), 172  
 coulomb (C), 127, 137, 160, 162, 166, 190, 198  
 counting quantities, 136, 151  
 curie (Ci), 168

## D

dalton (Da), 145-146  
 day (d), 145  
 decibel (dB), 145-146  
 decimal marker, 124, 150, 183-184  
 decimal metric system, 204  
 defining constants, 122, 125-129, 130, 135, 137, 197-199, 203, 206  
 definitions of base units, 130-135  
 degree Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), 133, 138, 141, 148, 149, 161, 162  
 derived quantity, 137-140  
 derived unit(s), 125, 126, 129, 137-141, 148, 151, 156, 204, 205, 206  
 digits in groups of three, grouping digits, 150, 162, 184  
 dimension (of a quantity), 136-137  
 dimensionless quantities, 174  
 dose equivalent, see sievert  
 dynamic viscosity (poise), 139, 166  
 dyne (dyn), 162, 163

**E**

electric current, 130, 132, 136, 140, 160, 163, 165, 191, 195, 199, 202, 203, 204, 205, 208  
 electrical units, 122, 155, 205  
 electron mass, 204  
 electronvolt (eV), 145-146  
 elementary charge, 127, 128, 132, 190, 191, 195, 198, 199, 206, 208  
 erg, 162  
 establishment of the SI, 153, 204-206  
 explicit constant definition, 191, 203  
 explicit unit definition, 202, 203

**F**

farad (F), 138, 160, 162, 166,  
 fine structure constant, 128, 192, 198, 204  
 foot, 146  
 formatting the value of a quantity, 149  
 fundamental constants (of physics), 122, 127, 128, 182, 188, 190, 191, 193, 197, 206, 207

**G**

gal (Gal), 145  
 Gauss, 205  
 general relativity, 107, 167  
 Giorgi, 205  
 gram, 144, 162, 168, 205  
 gram-atom, gram-molecule, 209  
 gray (Gy), 138, 140, 172-173, 176, 183

**H**

Hall effect (incl. quantum Hall effect), 176, 177-178, 190, 192, 198, 203, 208  
 heat capacity, 139, 140, 148, 170  
 hectare (ha), 145  
 henry (H), 132, 138, 160, 162, 166  
 hertz (Hz), 127, 137-138, 162, 166, 190, 198  
 historical notes, 202-210  
 hour (h), 145, 162  
 hyperfine splitting of the caesium atom, 190, 191

**I**

inch, 146  
 International Atomic Time (TAI), 171, 172  
 international prototype of the kilogram, 125, 131, 154, 207

international prototype of the metre, 153, 207  
 International System of Units (SI), 122-123, 125-126, 127-129, 153, 202-210  
 International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), 133, 169, 178  
 International Units (IU) WHO, 141  
 ionizing radiation, 118, 140, 141, 172-173, 174, 176  
 ISO/IEC 80000 series, 124, 126, 129, 140, 148  
 ISO/TC 12, 174  
 IUPAC, 206, 209; Green Book, 148  
 IUPAP SUNAMCO, 148; Red Book, 148

**J**

Josephson effect, 176, 177, 190, 192, 198, 203, 208  
 Josephson constant ( $K_J$ ,  $K_{J-90}$ ), 177, 190, 192, 198  
 joule (J), 127, 129, 137-138, 140, 160-161, 166, 190, 198

**K**

katal (kat), 138, 180  
 kelvin (K), 125, 127, 129, 130, 133, 169, 184, 187, 188, 190, 191, 193, 195, 197, 198, 199, 202, 203, 204, 205, 208  
 Kibble balance, 190, 203  
 kilogram, 125, 127, 130, 131, 137, 144, 158, 159, 160, 163, 165, 168, 179-180, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 195, 197, 198, 199, 202, 203, 204, 205, 207  
 kinematic viscosity (stokes), 166

**L**

legislation on units, 126  
 length, 127, 130, 131, 136, 145, 153, 202, 203, 204, 205, 207  
 litre (L or l), 124, 145, 147, 157  
 logarithmic ratio quantities, 145-146  
 lumen (lm), 127, 138, 141, 159, 162, 166, 190, 198; new lumen, 159  
 luminous efficacy, 127, 128, 129, 135, 173, 190, 191, 198, 199, 206, 210  
 luminous intensity, 130, 135, 136, 156, 204, 205, 210  
 lux (lx), 138, 141, 162, 166



**M**

magnetic constant, permeability of vacuum, 132, 192, 208  
 mandatory symbols for units, 130, 147-148  
 mass, 130, 131, 136, 144, 145, 154, 202, 203, 204, 205, 207  
 mass and weight, 159  
 Maxwell, 205  
 mesopic, 173  
 metre (m), 122, 124, 125, 126, 127, 130, 131, 153, 202, 203, 204, 205, 207  
 Metre Convention, 117-119, 122, 125, 158, 161, 164, 205  
 metric ton, 145  
 metric system, 117, 122, 159, 202, 205, 206  
 microarcsecond ( $\mu$ as), 145  
 milliarcsecond (mas), 145  
 minute (min), 145  
 MKS system, 160, 161, 205  
 MKSA system, 205  
 molar mass, 134, 192, 199, 209  
 mole (mol), 127, 129, 130, 134, 165, 172, 179, 180, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 195, 196, 197, 198, 199, 202, 204, 206, 209  
 molecular weight, 209  
 multiples (and submultiples) of the kilogram, 144, 168  
 multiples, prefixes for, 137-138, 143-144, 165, 168, 170, 173, 179, 205

**N**

neper (Np), 145-146  
 newton (N), 132, 137, 138, 140, 160, 162, 166, 171  
 non-SI units, 145-146, 149, 180  
 numerical value of a quantity, 148-149

**O**

ohm ( $\Omega$ ), 138, 160, 162, 166, 171, 176, 177-178, 192, 198, 205, 208  
 OIML, 126, 193, 195

**P**

pascal (Pa), 137, 171  
 percent, 151  
 photobiological quantities, 141, 201  
 photometric quantities, 173  
 photometric units, 159, 169  
 photopic vision, 173

Planck constant, 122, 127, 128, 131, 146, 188, 190, 191, 195, 197, 199, 203, 206, 207, 208  
 poise (P), 162  
 ppb, 151  
 ppm, 151  
 ppt, 151  
 practical units, 205  
 prefixes, 137, 138, 143, 145, 147, 165, 168, 170, 173, 179, 180, 204, 205, 206

**Q**

quantity, 127  
 quantity calculus, 148-149  
 quantity symbols, 136-137  
 quantity, base, 130, 136, 140, 174, 204  
 quantity, derived, 129, 134, 136-140  
 quantum Hall effect, 176, 177, 178, 190, 192, 198, 203, 208  
 quantum standard, 208

**R**

radian (rad), 137-138, 140, 151, 165, 174-175, 179  
 realization of a unit, 125-126, 128-129, 135, 141, 200, 202-204  
 recommended symbols for quantities, 130, 136  
 relativity, 130, 141-142  
 Rydberg constant, 204

**S**

scotopic, 173  
 second (s), 122, 127, 130, 135, 145, 147, 149, 153, 202, 203, 204, 205, 206-207  
 SI prefixes, 137-138, 143, 145, 147, 151, 157, 165, 204, 205, 206  
 SI, see *Système International d'Unités*  
 siemens (S), 138, 171  
 sievert (Sv), 138, 140, 141, 174, 176, 182-183  
 silicon sphere, 203  
 sound, units for, 141  
 special names and symbols for units, 137-140, 204  
 speed of light in vacuum, 122, 125, 126, 127, 128, 131, 172, 175, 181, 189, 190, 191, 197, 199, 202, 203, 206, 207,  
 standard atmosphere, 163  
 steradian (sr), 137-138, 151, 159, 165, 174-175, 179

stilb (sb), 162  
submultiples, prefixes for, 143-144, 165, 168,  
170, 179  
supplementary units, 138, 151, 157, 165, 170,  
204, 206  
Système International d'Unités (SI), see  
International System of Units

## T

TAI, see International Atomic Time  
tesla (T), 138, 166  
thermodynamic temperature, 130, 133, 136,  
155, 203, 204, 205, 208  
thermodynamic temperature scale, 162  
Thomson, 205  
time (duration), 130, 136, 145, 154, 204, 205,  
206-207  
tonne, 145, 162  
triple point of water, 125, 133, 160, 162, 169,  
184, 187, 192, 199, 202, 203, 208

## U

uncertainty, 127, 128, 150  
unit (SI), 129-142  
unit names, 148, 170

unit symbols, 147  
unit, base, see base unit(s)  
unit, derived, see derived unit(s)  
units for biological quantities, 201  
UTC, see Coordinated Universal Time

## V

value of a quantity, 127, 148-150  
verification of the kilogram, 207  
volt (V), 138, 160, 162, 166, 176-177, 192,  
198, 205, 208  
von Klitzing constant ( $R_K$ ,  $R_{K-90}$ ), 177, 178,  
190, 192, 198

## W

water, isotopic composition, 169, 184, 187,  
190, 208  
watt (W), 127, 137, 160, 162, 166, 190, 198  
watt balance, see Kibble balance  
Weber, 205  
weber (Wb), 138, 160, 166  
WHO, 141

## Y

yard, 146