

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

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, Taïpei 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 valeur 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, Δν<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 Δν<sub>Cs</sub> = 9 192 631 770 Hz. En inversant cette relation, la seconde est exprimée en fonction de la constante Δν<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

$$1\text{ A} = \frac{1}{(9\,192\,631\,770)(1,602\,176\,634 \times 10^{-19})} \Delta\nu_{\text{Cs}} e \approx 6,789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e.$$

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  $\epsilon_0$  (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  $\epsilon_0$ ,  $Z_0$ , 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  $\epsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$  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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  :

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

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 :

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

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

$$M(X) = N_A m(X) = N_A A_r(X) m_u.$$

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,  $\text{HCl}$  » ou de « quantité de benzène,  $\text{C}_6\text{H}_6$  ». 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,  $K_{\text{cd}}$ , 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  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .**

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

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

relation identique à

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

$$\approx 2,614\,830 \times 10^{10} (\Delta \nu_{\text{Cs}})^2 h K_{\text{cd}}.$$

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) W/sr. 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	$\nu$	$m^3\ kg^{-1}$
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 :

**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

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	$2^{80}$

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° = (π/180) rad
	minute	'	1' = (1/60)° = (π/ 10 800) rad
	seconde <sup>(b)</sup>	"	1" = (1/60)' = (π/ 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 = 1,660 539 040 (20) × 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	neper <sup>(h)</sup>	Np	voir notes de bas de page
	bel <sup>(h)</sup>	B	
	decibel <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, μas 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 2014 de CODATA. Elle sera mise à jour dans l'ajustement de 2018 de CODATA afin de tenir compte de la valeur de 2017, désormais fixée, de la constante de Planck  $h$ , ce qui permettra de réduire l'incertitude de 2014 d'un ordre de grandeur.
  - (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 des articles scientifiques et techniques.

### 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

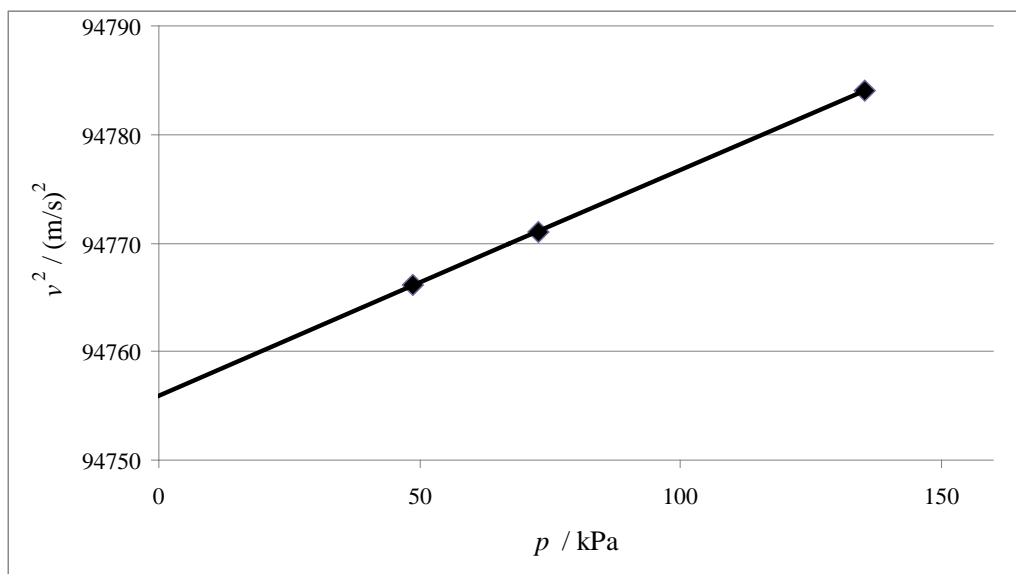
Les symboles des grandeurs sont en général formés d'une seule lettre en italique mais des informations complémentaires sur la grandeur peuvent être précisées par un indice ou un exposant ajouté au symbole ou au moyen de parenthèses. Par exemple,  $C$  est le symbole recommandé pour la capacité thermique,  $C_m$  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  $^{\circ}$ ,  $'$  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  $^{\circ}\text{C}$  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  $22,20^{\circ}$  plutôt que  $22^{\circ} 12'$ , sauf dans les domaines tels que la navigation, la cartographie, l'astronomie et la mesure d'angles très petits.

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

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

$l = 10,234 \text{ m}$   
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.

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.

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.

### 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,  $= A/r^2$  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>



		page
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	87
CIPM, 2013 :	mises à jour de la liste des fréquences étalons	87
26 <sup>e</sup> CGPM, 2018 :	révision du Système international d'unités (SI) (mise en œuvre le 20 mai 2019)	92

### Masse

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

### Temps

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

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

	<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 définition du mètre a été abrogée en 1960 par la 11<sup>e</sup> CGPM (Résolution 6, voir p. 53).

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 :

...

## 3<sup>e</sup> CGPM, 1901

### ■ Déclaration concernant la définition du litre (CR, 38-39)\*

\* Définition abrogée en 1964 par la 12<sup>e</sup> CGPM (Résolution 6, voir p. 57).

...

**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. ...

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

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

**CIPM, 1961****■ Décimètre cube et litre (PV, 29, 34)****Recommandation**

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

**CIPM, 1964****■ Étalons de fréquence (PV, 32, 26 et CR, 93)****Déclaration**

Le Comité international des poids et mesures,

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

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

**12<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 mètre 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  $f_{199\text{Hg}} = 1\ 128\ 575\ 290\ 808\ 154,8\ \text{Hz}$  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) =  $642\ 121\ 496\ 772\ 645,0\ \text{Hz}$  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) =  $688\ 358\ 979\ 309\ 308,3\ \text{Hz}$  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  $f_{88\text{Sr}^+} = 444\ 779\ 044\ 095\ 486,6\ \text{Hz}$  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  $f_{40\text{Ca}^+} = 411\ 042\ 129\ 776\ 398,4\ \text{Hz}$  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  $f_{1\text{H}} = 1\ 233\ 030\ 706\ 593\ 514\ \text{Hz}$  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  $f_{87\text{Sr}} = 429\ 228\ 004\ 229\ 873,2\ \text{Hz}$  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  $f_{171\text{Yb}} = 518\ 295\ 836\ 590\ 864,0\ \text{Hz}$  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  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 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  $\text{Wm}^{-2}$ , 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  $\epsilon_0$  (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
ISQ	International System of Quantities/Système international de grandeurs
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  
 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  
 kibioctet, 31  
 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  
   international de grandeurs, 17  
   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