

# Le Système international d'unités

## The International System of Units

Bureau  
international  
des poids  
et mesures



7<sup>e</sup> édition  
1998

Organisation  
intergouvernementale  
de la Convention  
du Mètre

Inclut / Includes

Supplément 2000 : additions et corrections

Supplement 2000: addenda and corrigenda



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

English version

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



---

**Bureau international  
des poids et mesures**

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

**7<sup>e</sup> édition 1998**

---

**Organisation intergouvernementale  
de la Convention du Mètre**

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

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 81).

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

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

Conception graphique :  
Monika Jost et Jean-Francis Chériez

Imprimé par : Stedi, Paris

ISBN 92-822-2154-7

## 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 physiques ; il est chargé :

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

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

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

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

Le Comité international comprend dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport

Au 31 décembre 1997, quarante-huit États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine, Corée (Rép. de), Corée (Rép. pop. dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran (Rép. islamique d'), Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Singapour, Slovaquie, Suède, Suisse, Tchèque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

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.

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) et aux échelles de temps (1988). 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 et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

Environ quarante-cinq physiciens et techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau international. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

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

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 (CCQM), créé en 1993.

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

- *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures (CR)* ;
- *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures (PV)* ;
- *Sessions des Comités consultatifs.*

Le Bureau international publie aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre *Le Système international d'unités (SI)*, cette 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 d'une publication dans des journaux scientifiques ; une liste en est donnée chaque année dans les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

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



<b>Le BIPM et la Convention du Mètre</b>	<b>5</b>
<b>Avertissement de la 7<sup>e</sup> édition</b>	<b>10</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>12</b>
1.1 Historique	12
1.2 Les deux classes d'unités SI	14
1.3 Les préfixes SI	15
1.4 Système de grandeurs	15
1.5 Les unités SI dans le cadre de la relativité générale	15
1.6 Législation sur les unités	16
<b>2 Unités SI</b>	<b>17</b>
2.1 Unités SI de base	17
2.1.1 Définitions	17
2.1.1.1 Unité de longueur (mètre)	17
2.1.1.2 Unité de masse (kilo gramme)	18
2.1.1.3 Unité de temps (seconde)	18
2.1.1.4 Unité de courant électrique (ampère)	18
2.1.1.5 Unité de température thermodynamique (kelvin)	19
2.1.1.6 Unité de quantité de matière (mole)	20
2.1.1.7 Unité d'intensité lumineuse (candela)	20
2.1.2 Symboles des unités de base	21
2.2 Unités SI dérivées	21
2.2.1 Unités exprimées à partir des unités de base	22
2.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités utilisant des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers	22
2.2.3 Unités des grandeurs sans dimension, grandeurs de dimension un	25
<b>3 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI</b>	<b>26</b>
3.1 Préfixes SI	26
3.2 Le kilogramme	26
<b>4 Unités en dehors du SI</b>	<b>27</b>
4.1 Unités en usage avec le SI	27
4.2 Autres unités en dehors du SI	31

<b>5 Règles d'écriture des noms et symboles des unités SI</b>	<b>33</b>
5.1 Principes généraux	33
5.2 Symboles des unités SI	33
5.3 Expression algébrique des symboles d'unités SI	33
5.4 Règles d'emploi des préfixes SI	34
<b>Annexe 1. Décisions de la Conférence générale et du Comité international des poids et mesures</b>	<b>35</b>
1 Décisions relatives à l'établissement du Système international d'unités, SI	35
1.1 Système pratique d'unités : établissement du SI	35
1.2 Le SI	36
2 Décisions relatives aux unités de base du Système international	39
2.1 Longueur	39
2.2 Masse	42
2.3 Temps	42
2.4 Courant électrique	45
2.5 Température thermodynamique	46
2.6 Quantité de matière	48
2.7 Intensité lumineuse	49
3 Décisions relatives aux unités SI dérivées et supplémentaires	50
3.1 Unités SI dérivées	50
3.2 Unités SI supplémentaires	52
4 Décisions relatives à la terminologie et aux unités en usage avec le SI	53
4.1 Préfixes SI	53
4.2 Symboles d'unités et nombres	54
4.3 Noms d'unités	55
4.4 Unités en usage avec le SI ; un exemple : le litre	56
<b>Annexe 2. Mise en pratique des définitions des principales unités</b>	<b>58</b>
1 Longueur	58
2 Masse	65
3 Temps	66
3.1 Unité de temps	66
3.2 Comparaison d'horloges, échelles de temps	67
3.3 Les temps légaux	69
4 Grandeurs électriques	69
5 Température	72
6 Quantité de matière	74
7 Grandeurs photométriques	75
<b>Index</b>	<b>77</b>

## Avertissement de la 7<sup>e</sup> édition

Depuis 1970, le Bureau international des poids et mesures (BIPM) a publié sept éditions de ce document qui rassemble les textes de toutes les Résolutions et Recommandations de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) et du Comité international des poids et mesures (CIPM) concernant le Système international d'unités. Pour consulter ces décisions, il faut se référer aux volumes successifs des *Comptes rendus* de la Conférence générale (CR) et des *Procès-verbaux* du Comité international (PV) ; les plus récentes d'entre elles figurent aussi dans la revue *Metrologia*. Pour simplifier l'utilisation pratique du Système international d'unités, le texte accompagne les décisions de commentaires explicatifs et de références aux normes internationales adoptées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO).

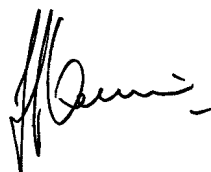
Le Comité consultatif des unités (CCU) du Comité international a contribué à la rédaction de ce document et en a approuvé le texte définitif. Cette 7<sup>e</sup> édition est une révision de la 6<sup>e</sup> édition (1991) ; elle tient compte des décisions de la Conférence générale et du Comité international prises depuis 1991. Elle mentionne aussi certaines propositions du CCU.

L'annexe 1 reproduit les décisions (Résolutions, Recommandations, Déclarations) prises depuis 1889 par la Conférence générale et le Comité international concernant les unités de mesure et le Système international d'unités.

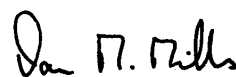
L'annexe 2 décrit sommairement les opérations par lesquelles les laboratoires de métrologie peuvent effectuer les mesures physiques, en conformité avec les définitions théoriques énoncées dans le texte principal, afin de réaliser les unités physiques et de certifier les étalons de la plus haute qualité métrologique. Pour la première fois, dans cette édition, la définition et donc les réalisations pratiques du mètre et de la seconde sont considérées dans le contexte de la relativité générale. Sauf avis contraire, les incertitudes sont exprimées sous la forme d'incertitudes-types composées ou d'incertitudes-types relatives composées.

Depuis plus de vingt-cinq ans, ce document sert d'ouvrage de référence dans de nombreux pays, organisations et unions scientifiques. Afin d'en rendre la consultation facilement accessible à un nombre plus grand de lecteurs, le Comité international a décidé, en 1985, d'adjoindre à la 5<sup>e</sup> édition une traduction en langue anglaise ; cette 7<sup>e</sup> édition est également bilingue. Lors de la première traduction en langue anglaise, le Bureau international s'est efforcé de publier la traduction la plus fidèle possible, en collaboration étroite avec le National Physical Laboratory (Teddington, Royaume-Uni) et le National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, États-Unis), qui s'appelait alors le National Bureau of Standards. Les textes français et anglais de la présente édition ont été préparés par le Bureau international en étroite collaboration avec le CCU. En 1997, le Comité international a décidé d'utiliser le point comme séparateur décimal dans le texte anglais ; il s'agit ici d'une traduction de la virgule, qui est le séparateur décimal en français, et cela n'implique pas d'utiliser le point comme séparateur décimal dans les autres langues. Il faut mentionner les petites variantes d'orthographe que l'on rencontre dans les pays de langue anglaise (par exemple : « metre » et « meter », « litre » et « liter »). À ce sujet, le texte anglais suit ici l'usage recommandé par la norme ISO 31 (1992), *Grandeurs et unités*. Le lecteur doit cependant noter que le texte officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a un doute sur l'interprétation.

Novembre 1997



T. J. QUINN  
*Directeur du BIPM*



I. M. MILLS  
*Président du CCU*

# 1 Introduction

## 1.1 Historique

La 9<sup>e</sup> CGPM (1948, Résolution 6 ; CR, 64), chargea le Comité international :

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

Les décisions de la Conférence générale figurent dans les *Comptes rendus des séances de la Conférence générale des poids et mesures* (mentionnés sous la forme CR).

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

La 10<sup>e</sup> CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) et la 14<sup>e</sup> CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36) adoptèrent comme unités de base de ce système pratique d'unités les unités des sept grandeurs suivantes : longueur, masse, temps, intensité de courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse.

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

Nous pouvons résumer ainsi les principales étapes historiques qui ont conduit à ces décisions importantes de la Conférence générale :

- La création du Système métrique décimal au moment de la Révolution française et le dépôt qui en a résulté, le 22 juin 1799, de deux étalons en platine représentant le mètre et le kilogramme aux Archives de la République à Paris peuvent être considérés comme la première étape ayant conduit au Système international d'unités actuel.

- En 1832, Gauss œuvra activement en faveur de l'application du Système métrique, associé à la seconde définie en astronomie, comme système cohérent d'unités pour les sciences physiques. Gauss fut le premier à faire des mesures *absolues* du champ magnétique terrestre en utilisant un système décimal fondé sur les *trois unités mécaniques* millimètre, gramme et seconde pour, respectivement, les grandeurs longueur, masse et temps. Par la suite, Gauss et Weber ont aussi effectué des mesures de phénomènes électriques.
- 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) dans les années 1860. Ils exprimèrent la nécessité d'un *système cohérent d'unités* formé 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 du micro au méga pour exprimer les sous-multiples et multiples décimaux. C'est en grande partie à l'utilisation de ce système que l'on doit les progrès de la physique, en tant que science expérimentale, observés par la suite.
- Les unités CGS cohérentes choisies pour les domaines de l'électricité et du magnétisme s'étant avérées mal commodes, le BAAS et le Congrès international d'électricité, qui précéda la Commission électrotechnique internationale (CEI), approuvèrent, dans les années 1880, un système mutuellement cohérent d'*unités pratiques*. Parmi celles-ci figuraient l'ohm pour la résistance électrique, le volt pour la force électromotrice et l'ampère pour le courant électrique.
- Après la signature de la Convention du Mètre le 20 mai 1875, le Comité international se consacra à la construction de nouveaux prototypes, choisissant le mètre et le kilogramme comme unités de base de longueur et de masse. En 1889 la 1<sup>re</sup> CGPM sanctionna les Prototypes internationaux du mètre et du kilogramme. 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, le système MKS.
- En 1901, Giorgi montra qu'il était possible d'associer les unités mécaniques de ce système mètre-kilogramme-seconde au système pratique d'unités électriques pour former un seul système cohérent quadri-dimensionnel en ajoutant à ces trois unités de base une quatrième unité, de nature électrique, telle que l'ampère ou l'ohm, et en rationalisant les expressions utilisées en électromagnétisme. La proposition de Giorgi ouvrit la voie à d'autres extensions.
- Après la révision de la Convention du Mètre par la 6<sup>e</sup> CGPM en 1921, qui étendit les attributions et les responsabilités du Bureau international à d'autres domaines de la physique, et la création du CCE par la 7<sup>e</sup> CGPM qui en a résulté en 1927, la proposition de Giorgi fut discutée en détail par la CEI, l'UIPPA et d'autres organisations internationales. Ces discussions conduisirent le CCE à proposer, en 1939, l'adoption d'un système quadri-dimensionnel fondé sur le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère, le système MKSA, une proposition qui fut approuvée par le Comité international en 1946.

- À la suite d'une enquête internationale effectuée par le Bureau international à partir de 1948, la 10<sup>e</sup> CGPM, en 1954, approuva l'introduction de l'*ampère*, du *kelvin* et de la *candela* comme unités de base, respectivement pour l'intensité de courant électrique, la température thermodynamique et l'intensité lumineuse. La 11<sup>e</sup> CGPM donna le nom *Système international d'unités (SI)* à ce système en 1960. Lors de la 14<sup>e</sup> CGPM, en 1971, la mole fut ajoutée au SI comme unité de base pour la quantité de matière, portant à sept au total le nombre d'unités de base du SI tel que nous le connaissons aujourd'hui.

## 1.2 Les deux classes d'unités SI

On distingue deux classes d'unités SI :

- les unités *de base* ;
- les unités *dérivées*.

Du point de vue scientifique, la division des unités SI en ces deux classes est arbitraire car elle n'est pas imposée par la physique. Néanmoins, la Conférence générale a pris en considération les avantages que présente l'adoption d'un système mondial d'unités, unique et pratique, pour les relations internationales, l'enseignement et la recherche scientifique, et a décidé de fonder le Système international sur un choix de sept unités bien définies que l'on convient de considérer comme indépendantes du point de vue dimensionnel : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela (*voir* 2.1, p. 17). Ces unités SI sont appelées *unités de base*.

La deuxième classe des unités SI est celle des *unités dérivées*. Ce sont les unités qui sont formées en combinant les unités de base d'après des relations algébriques qui lient les grandeurs correspondantes. Les noms et les symboles de ces unités sont exprimés à l'aide des noms et symboles des unités de base. Certains d'entre eux peuvent être remplacés par des noms et des symboles spéciaux qui peuvent être utilisés pour exprimer les noms et symboles d'autres unités dérivées (*voir* 2.2, p. 21).

Les unités SI de ces deux classes forment un ensemble *cohérent* d'unités, au sens donné au mot cohérent par les spécialistes, c'est-à-dire un système d'unités liées entre elles par des règles de multiplication et division sans facteur numérique autre que le facteur 1. Suivant la Recommandation 1 (1969 ; PV, 37, 30-31 et *Metrologia*, 1970, 6, 66) du Comité international, les unités de cet ensemble cohérent d'unités sont désignées sous le nom d'*unités SI*.

Il est important de souligner que chaque grandeur physique n'a qu'une seule unité SI, même si cette unité peut être exprimée sous différentes formes. L'inverse, toutefois, n'est pas vrai ; une même unité SI peut dans certains cas être employée pour exprimer les valeurs de grandeurs différentes (*voir* p. 24).

La 11<sup>e</sup> CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) avait admis une classe séparée d'unités SI, dénommée unités supplémentaires, qui contenait le radian et le stéradian, unités d'angle plan et d'angle solide. La 20<sup>e</sup> CGPM (1995, Résolution 8 ; CR, 223 et *Metrologia*, 1996, 33, 83) a supprimé la classe des unités supplémentaires dans le SI et a intégré le radian et le stéradian dans la classe des unités dérivées.

Les recommandations du Comité international figurent dans les *Procès-verbaux des séances du Comité international des poids et mesures* (mentionnés sous la forme PV).

### 1.3 Les préfixes SI

La Conférence générale a adopté une série de préfixes pour la formation des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI (*voir* 3.1 et 3.2, p. 26). Suivant la Recommandation 1 (1969) du Comité international, mentionnée précédemment, l'ensemble de ces préfixes est désigné sous le nom de *préfixes SI*.

Les unités SI, c'est-à-dire les unités de base et les unités dérivées du SI, forment un ensemble cohérent, *l'ensemble des unités SI*. Les multiples et sous-multiples des unités SI qui sont formés au moyen des préfixes SI doivent être désignés par leur nom complet, *multiples et sous-multiples décimaux des unités SI*. Ces multiples et sous-multiples décimaux des unités SI ne sont pas cohérents avec les unités SI proprement dites.

Par dérogation à la règle, les multiples et sous-multiples du kilogramme sont formés en attachant des noms de préfixes au nom de l'unité « gramme » et des symboles de préfixes au symbole d'unité « g ».

### 1.4 Système de grandeurs

Cette brochure ne traite pas du système de grandeurs à utiliser avec les unités SI, domaine dont s'occupe le Comité technique 12 de l'Organisation internationale de normalisation (ISO/TC 12) qui a publié depuis 1955 une série de normes internationales sur les grandeurs et les unités en recommandant fortement l'emploi du Système international d'unités.

Dans ces normes internationales, l'ISO a adopté un système de grandeurs physiques fondé sur les sept grandeurs de base correspondant aux sept unités de base : longueur, masse, temps, intensité de courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse. Les autres grandeurs, appelées grandeurs dérivées, sont définies en fonction de ces sept grandeurs de base ; les relations entre les grandeurs dérivées et les grandeurs de base s'expriment par un système d'équations. C'est ce système de grandeurs et ce système d'équations qu'il convient d'employer avec les unités SI.

Pour plus d'informations sur le système de grandeurs en usage avec les unités SI, *voir* la norme internationale ISO 31, *Grandeurs et unités* (Recueil de normes ISO, 3<sup>e</sup> édition, ISO, Genève, 1993).

### 1.5 Les unités SI dans le cadre de la relativité générale

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

Les réalisations d'une unité à l'aide de différents étalons sont généralement comparées au niveau local. Toutefois, pour les étalons de fréquence, il est possible d'effectuer de telles comparaisons à distance au moyen de signaux électro-

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



magnétiques. Pour interpréter les résultats, il est nécessaire de faire appel à la théorie de la relativité générale puisque celle-ci prédit, entre autres choses, un décalage de fréquence entre les étalons d'environ  $1 \times 10^{-16}$  en valeur relative par mètre d'altitude à la surface de la Terre. Des effets de cet ordre de grandeur peuvent être comparables à l'incertitude de la réalisation du mètre ou de la seconde fondée sur un signal périodique ou sur une fréquence donnée (*voir* Annexe 2, p. 58).

## 1.6 Législation sur les unités

Les États fixent, par voie législative, les règles concernant l'utilisation des unités sur le plan national, soit d'une manière générale, soit seulement dans certains domaines comme le commerce, la santé, la sécurité publique ou l'enseignement. Dans la plupart des pays, ces législations sont fondées sur l'emploi du Système international d'unités.

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

## 2 Unités SI

### 2.1 Unités SI de base

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

#### 2.1.1 Définitions

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

##### 2.1.1.1 Unité de longueur (mètre)

La définition du mètre fondée sur le prototype international en platine iridié, en vigueur depuis 1889, avait été remplacée lors de la 11<sup>e</sup> CGPM (1960) par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation du mètre. La 17<sup>e</sup> CGPM (1983, Résolution 1 ; CR, 97 et *Metrologia*, 1984, **20**, 25) a remplacé en 1983 cette dernière définition par la suivante :

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

Cette définition a pour effet de fixer la vitesse de la lumière à  $299\,792\,458\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  exactement. L'ancien prototype international du mètre, qui fut sanctionné par la 1<sup>re</sup> CGPM en 1889 (CR, 34-38), est toujours conservé au BIPM dans les conditions fixées en 1889.

### 2.1.1.2 Unité de masse (kilogramme)

Le prototype international du kilogramme, en platine iridié, est conservé au Bureau international dans les conditions fixées par la 1<sup>re</sup> CGPM en 1889 (CR, 34-38) lorsqu'elle sanctionna ce prototype et déclara :

Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.

La 3<sup>e</sup> CGPM (1901 ; CR, 70), dans une déclaration tendant 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 déclaration complète figure p. 42.

### 2.1.1.3 Unité de temps (seconde)

La seconde, unité de temps, fut définie à l'origine comme la fraction  $1/86\,400$  du jour solaire moyen. La définition exacte du « jour solaire moyen » était laissée aux astronomes. Toutefois, leurs travaux ont montré que le jour solaire moyen ne présentait pas les garanties voulues d'exactitude par suite des irrégularités de la rotation de la Terre. Pour donner plus de précision à la définition de l'unité de temps, la 11<sup>e</sup> CGPM (1960 ; CR, 86) sanctionna une définition, donnée par l'Union astronomique internationale, qui était fondée sur l'année tropique. Cependant, les recherches expérimentales avaient déjà montré qu'un étalon atomique d'intervalle de temps, fondé sur une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule, pouvait être réalisé et reproduit avec une exactitude beaucoup plus élevée. Considérant qu'une définition de haute précision de l'unité de temps du Système international était indispensable, la 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 1 ; CR, 103 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) a remplacé la définition de la seconde par la suivante :

**La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.**

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.

### 2.1.1.4 Unité de courant électrique (ampère)

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

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

**L'ampère est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.**

L'expression « unité MKS de force » qui figure dans le texte original de 1946 a été remplacée ici par « newton », nom adopté pour cette unité par la 9<sup>e</sup> CGPM (1948, Résolution 7 ; CR, 70). Cette définition a pour effet de fixer la perméabilité du vide à  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  exactement.

### 2.1.1.5 Unité de température thermodynamique (kelvin)

La définition de l'unité de température thermodynamique fut en fait donnée par la 10<sup>e</sup> CGPM (1954, Résolution 3 ; CR, 79) qui choisit le point triple de l'eau comme point fixe fondamental en lui attribuant la température de 273,16 K par définition. La 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 3 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) adopta le nom *kelvin* (symbole K) au lieu de « degré Kelvin » (symbole °K) et définit l'unité de température thermodynamique comme suit (Résolution 4 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) :

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

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

$$t = T - T_0.$$

L'unité de température Celsius est le degré Celsius, symbole °C, égal à l'unité kelvin par définition. Un intervalle ou une différence de température peut s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius (13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 3, mentionnée ci-dessus). La valeur numérique d'une température Celsius  $t$  exprimée en degrés Celsius est donnée par la relation :

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

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

### 2.1.1.6 Unité de quantité de matière (mole)

Après la découverte des lois fondamentales de la chimie, on a utilisé, pour spécifier les quantités des divers éléments ou composés chimiques, des unités portant par exemple les noms de « atome-gramme » et « molécule-gramme ». Ces unités étaient liées directement aux « poids atomiques » et aux « poids moléculaires » qui étaient en réalité des masses relatives. Les « poids atomiques » furent d'abord rapportés à celui de l'élément chimique oxygène, pris par convention égal à 16. Mais, tandis que les physiciens séparaient les isotopes au spectromètre de masse et attribuaient la valeur 16 à l'un des isotopes de l'oxygène, les chimistes attribuaient la même valeur au mélange (de composition légèrement variable) des isotopes 16, 17 et 18 qui constitue l'élément oxygène naturel. Un accord entre l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) mit fin à cette dualité en 1959-1960. Depuis lors, physiciens et chimistes sont convenus d'attribuer la valeur 12, exactement, au « poids atomique », ou selon une formulation plus correcte à la masse atomique relative, de l'isotope 12 du carbone (carbone 12,  $^{12}\text{C}$ ). L'échelle unifiée ainsi obtenue donne les valeurs des masses atomiques relatives.

Il restait à définir l'unité de quantité de matière en fixant la masse correspondante de carbone 12 ; par un accord international, cette masse a été fixée à 0,012 kg et l'unité de la grandeur « quantité de matière » a reçu le nom de *mole* (symbole mol).

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

1. **La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ; son symbole est « mol ».**
2. **Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.**

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

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

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

### 2.1.1.7 Unité d'intensité lumineuse (candela)

Les unités d'intensité lumineuse fondées sur des étalons à flamme ou à filament incandescent, qui étaient en usage dans différents pays avant 1948, furent d'abord remplacées par la « bougie nouvelle » fondée sur la luminance du radiateur de Planck (corps noir) à la température de congélation du platine. Cette modification avait été préparée dès avant 1937 par la Commission internationale de l'éclairage

(CIE) et par le Comité international ; la décision fut prise par le Comité international en 1946. Elle fut ratifiée en 1948 par la 9<sup>e</sup> CGPM qui adopta pour cette unité un nouveau nom international, la *candela* (symbole cd) ; en 1967, la 13<sup>e</sup> CGPM (Résolution 5 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) donna une forme amendée à la définition de 1946.

En 1979, en raison des difficultés expérimentales de 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 :

**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.**

### 2.1.2 Symboles des unités de base

Les unités de base du Système international sont rassemblées dans le tableau 1 avec leur nom et leur symbole (10<sup>e</sup> CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) ; 11<sup>e</sup> CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) ; 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 3 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) ; 14<sup>e</sup> CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36)).

**Tableau 1. Unités SI de base**

Grandeur de base	Unité SI de base	
	Nom	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
courant électrique	ampère	A
température thermodynamique	kelvin	K
quantité de matière	mole	mol
intensité lumineuse	candela	cd

## 2.2 Unités SI dérivées

Les unités dérivées sont des unités qui peuvent être exprimées à partir des unités de base au moyen des symboles mathématiques de multiplication et de division. Certaines unités dérivées ont reçu des noms spéciaux et des symboles particuliers qui peuvent eux-mêmes être utilisés avec les symboles d'autres unités de base ou dérivées pour exprimer les unités d'autres grandeurs.

### 2.2.1 Unités exprimées à partir des unités de base

Le tableau 2 donne quelques exemples d'unités dérivées exprimées directement à partir des unités de base. Les unités dérivées sont obtenues par multiplication et division des unités de base.

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

Grandeur dérivée	Unité SI dérivée	
	Nom	Symbole
superficie	mètre carré	m <sup>2</sup>
volume	mètre cube	m <sup>3</sup>
vitesse	mètre par seconde	m/s
accélération	mètre par seconde carrée	m/s <sup>2</sup>
nombre d'ondes	mètre à la puissance moins un	m <sup>-1</sup>
masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m <sup>3</sup>
volume massique	mètre cube par kilogramme	m <sup>3</sup> /kg
densité de courant	ampère par mètre carré	A/m <sup>2</sup>
champ magnétique	ampère par mètre	A/m
concentration (de quantité de matière)	mole par mètre cube	mol/m <sup>3</sup>
luminance lumineuse	candela par mètre carré	cd/m <sup>2</sup>
indice de réfraction	(le nombre) un	1 <sup>(a)</sup>

(a) En général, on n'emploie pas le symbole « 1 » avec une valeur numérique.

### 2.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités utilisant des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Par souci de commodité, certaines unités dérivées, qui sont mentionnées au tableau 3, ont reçu un nom spécial et un symbole particulier. Ces noms et symboles peuvent eux-mêmes être utilisés pour exprimer d'autres unités dérivées : quelques exemples figurent au tableau 4. Les noms spéciaux et les symboles particuliers permettent d'exprimer, sous une forme condensée, des unités fréquemment utilisées.

Les trois derniers noms et symboles d'unités figurant au bas du tableau 3 sont particuliers : ils furent spécifiquement approuvés par la 15<sup>e</sup> CGPM (1975, Résolutions 8 et 9 ; CR, 105 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180) et la 16<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 5 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, **16**, 56) pour la sauvegarde de la santé humaine.

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

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

Grandeur dérivée	Nom	Symbole	Unité SI dérivée	
			Expression utilisant d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
angle plan	radian <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
angle solide	stéradian <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
fréquence	hertz	Hz		$s^{-1}$
force	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pression, contrainte	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
énergie, travail, quantité de chaleur	joule	J	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
puissance, flux énergétique	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
quantité d'électricité, charge électrique	coulomb	C		$s \cdot A$
différence de potentiel électrique, force électromotrice	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacité électrique	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
résistance électrique	ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
conductance électrique	siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
flux d'induction magnétique	weber	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
induction magnétique	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
température Celsius	degré Celsius <sup>(d)</sup>	°C		K
flux lumineux	lumen	lm	cd · sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
éclairement lumineux	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
activité (d'un radionucléide)	becquerel	Bq		$s^{-1}$
dose absorbée, énergie massique (communiquée), kerma	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
équivalent de dose, équivalent de dose ambiant, équivalent de dose directionnel, équivalent de dose individuel, dose équivalente dans un organe	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) Le radian et le stéradian peuvent être utiles, dans les expressions des unités dérivées, pour distinguer des grandeurs de nature différente ayant la même dimension. Des exemples de leur utilisation pour former des noms d'unités dérivées sont mentionnés au tableau 4.

(b) En pratique, on emploie les symboles rad et sr lorsque c'est utile, mais l'unité dérivée « 1 » n'est habituellement pas mentionnée.

(c) En photométrie, on maintient généralement le nom et le symbole du stéradian, sr, dans l'expression des unités.

(d) Cette unité peut être utilisée en association avec des préfixes SI, comme par exemple pour exprimer le sous-multiple millidegré Celsius, m°C.



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

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

Une même unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes, comme on l'a mentionné au paragraphe 1.2 (p. 14). Dans le tableau ci-dessus, où l'énumération des grandeurs citées n'est pas limitative, on en trouve plusieurs exemples. Ainsi joule par kelvin (J/K) est le nom de l'unité SI pour la grandeur capacité thermique aussi bien que pour la grandeur entropie ; de même ampère (A) est le nom de l'unité SI pour la grandeur de base courant électrique aussi bien que pour la grandeur dérivée force magnétomotrice. Il ne suffit donc pas d'indiquer le nom de l'unité pour faire connaître la grandeur mesurée : cette règle

s'applique non seulement aux textes scientifiques et techniques mais aussi, par exemple, aux appareils de mesure (c'est-à-dire qu'ils doivent porter non seulement l'indication de l'unité mais aussi l'indication de la grandeur mesurée).

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

En pratique, afin de réduire le risque de confusion entre des grandeurs ayant la même dimension, on exprime leur unité en employant de préférence un nom spécial ou une combinaison particulière d'unités. Par exemple, on appelle l'unité SI de fréquence hertz, plutôt que seconde à la puissance moins un et l'unité SI de vitesse angulaire radian par seconde plutôt que seconde à la puissance moins un (dans ce cas l'usage du nom radian souligne le fait que la vitesse angulaire est égale à  $2\pi$  la fréquence de rotation). De même, on appelle l'unité SI de moment d'une force newton mètre, plutôt que joule.

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

### 2.2.3 Unités des grandeurs sans dimension, grandeurs de dimension un

Certaines grandeurs sont définies par le rapport de deux grandeurs de même nature ; elles ont une dimension qui peut être exprimée par le nombre un. L'unité associée à de telles grandeurs est nécessairement une unité dérivée cohérente avec les autres unités du SI, et comme elle résulte du rapport de deux unités SI identiques, cette unité peut aussi être exprimée par le nombre un. Ainsi l'unité SI de toutes les grandeurs dont la dimension est un produit de dimension égal à un est le nombre un. On peut citer, comme exemple de telles grandeurs, l'indice de réfraction, la perméabilité relative ou le facteur de frottement. Parmi les autres grandeurs ayant pour unité le nombre un, il y a les « nombres caractéristiques » comme le nombre de Prandtl  $\eta c_p/\lambda$  et les nombres qui servent à indiquer un comptage, comme le nombre de molécules, la dégénérescence (nombre de niveaux d'énergie) ou la fonction de partition en thermodynamique statistique. Toutes ces grandeurs sont décrites comme étant sans dimension, ou de dimension un, et ont pour unité l'unité SI cohérente 1. La valeur de ces grandeurs n'est exprimée que par un nombre, en général l'unité 1 n'est pas mentionnée explicitement. Dans certains cas, cependant, cette unité se voit attribuer un nom spécial, en vue principalement d'éviter la confusion avec certaines unités dérivées composées. C'est le cas du radian, du stéradian et du neper.

Le Comité international, reconnaissant l'importance particulière des unités relatives à la santé humaine, avait approuvé un texte explicatif sur le sievert lors de la rédaction de la 5<sup>e</sup> édition de cette brochure : voir Recommandation 1 (CI-1984) du Comité international (PV, 1984, 52, 31 et *Metrologia*, 1985, 21, 90).

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

### 3.1 Préfixes SI

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

Ces préfixes SI représentent strictement des puissances de 10. Ils ne doivent pas être utilisés pour exprimer des multiples de 2 (par exemple, un kilobit représente 1000 bits et non 1024 bits).

Tableau 5. Préfixes SI

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

### 3.2 Le kilogramme

Parmi les unités de base du Système international, l'unité de masse est la seule dont le nom, pour des raisons historiques, contienne un préfixe. Les noms et les symboles des multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse sont formés par l'adjonction de préfixes au mot « gramme » et de symboles de ces préfixes au symbole de l'unité « g » (CIPM, 1967, Recommandation 2 ; PV, **35**, 29 et *Metrologia*, 1968, **4**, 45).

*Par exemple* :  $10^{-6}$  kg = 1 mg (1 milligramme)  
*mais pas* 1  $\mu$ kg (1 microkilogramme).

## 4 Unités en dehors du SI

L'usage des unités SI est recommandé dans les sciences, les techniques et le commerce. Ces unités sont adoptées au niveau international par la Conférence générale et servent aujourd'hui de référence pour définir toutes les autres unités. Les unités de base du SI et les unités SI dérivées, y compris les unités ayant des noms spéciaux, ont l'avantage essentiel de former un ensemble cohérent et, par conséquent, de rendre inutiles les conversions entre unités lorsque l'on donne des valeurs particulières aux grandeurs dans des équations entre grandeurs.

Cependant, l'on constate que certaines unités en dehors du SI sont encore largement utilisées dans les publications scientifiques, techniques ou commerciales, et certaines le seront probablement encore pendant de nombreuses années. D'autres unités en dehors du SI, comme les unités de temps, sont d'un usage si répandu dans la vie quotidienne, et si profondément enraciné dans l'histoire et la culture des hommes, qu'elles continueront à être utilisées dans l'avenir prévisible. C'est la raison pour laquelle les principales unités en dehors du SI sont mentionnées dans les tableaux suivants.

Ce n'est pas parce que des tableaux d'unités en dehors du SI figurent dans ce document que l'on peut en déduire qu'il faut encourager l'usage de ces unités. À l'exception de quelques cas, discutés plus loin, les unités SI doivent toujours être utilisées de préférence aux unités en dehors du SI. Il est souhaitable d'éviter d'associer des unités SI à des unités en dehors du SI ; en particulier, l'association de ces unités aux unités SI pour former des unités composées doit être limitée à des cas particuliers afin de ne pas perdre l'avantage de la cohérence conférée par l'usage des unités SI.

### 4.1 Unités en usage avec le SI

Le Comité international (1969) a reconnu que les utilisateurs pouvaient avoir besoin d'employer les unités SI en association avec certaines unités qui n'appartiennent pas au Système international, mais qui jouent un rôle important et sont largement répandues. Ces unités avaient été classées dans trois catégories : les unités en usage avec le SI ; les unités maintenues temporairement ; les unités à déconseiller. Reconsidérant cette classification, le Comité international (1996) a approuvé une nouvelle classification des unités en dehors du SI qui peuvent être utilisées avec le SI : les unités en usage avec le SI, tableau 6 ; les unités en usage

avec le SI dont la valeur est obtenue expérimentalement, tableau 7 ; les autres unités en usage avec le SI, répondant à des besoins spécifiques, tableau 8.

Le tableau 6 donne la liste des unités en dehors du SI en usage avec le SI. Il comprend des unités employées quotidiennement, en particulier les unités usuelles de temps et d'angle, ainsi que d'autres unités de plus en plus importantes d'un point de vue technique.

**Tableau 6. Unités en dehors du Système international en usage avec le Système international**

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
minute	min	1 min = 60 s
heure <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 min = 3600 s
jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
degré <sup>(b)</sup>	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad
minute	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\,800$ ) rad
seconde	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\,000$ ) rad
litre <sup>(c)</sup>	l, L	1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
tonne <sup>(d,e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
neper <sup>(f,h)</sup>	Np	1 Np = 1
bel <sup>(g,h)</sup>	B	1 B = (1/2) ln 10 (Np) <sup>(i)</sup>

(a) Le symbole de cette unité est inclus dans la Résolution 7 de la 9<sup>e</sup> CGPM (1948; CR, 70).

(b) La norme ISO 31 recommande que le degré soit sub-divisé de manière décimale plutôt qu'en utilisant la minute et la seconde.

(c) Cette unité et le symbole l ont été adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41). L'autre symbole, L, a été adopté par la 16<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 6 ; CR, 101 et *Metrologia*, 1980, 16, 56-57) pour éviter le risque de confusion entre la lettre l et le chiffre 1. La définition actuelle du litre est donnée dans la Résolution 6 de la 12<sup>e</sup> CGPM (1964 ; CR, 93).

(d) Cette unité et son symbole ont été adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41).

(e) Dans certains pays de langue anglaise, cette unité porte le nom de « metric ton ».

(f) Le neper est utilisé pour exprimer la valeur de grandeurs logarithmiques telles que le niveau de champ, le niveau de puissance, le niveau de pression acoustique ou le décrétement logarithmique. Les logarithmes naturels sont utilisés pour obtenir les valeurs numériques des grandeurs exprimées en nepers. Le neper est cohérent avec le SI, mais n'a pas encore été adopté par la Conférence générale comme unité SI. Pour de plus amples informations, voir la norme internationale ISO 31.

(g) Le bel est utilisé pour exprimer la valeur de grandeurs logarithmiques telles que le niveau de champ, le niveau de puissance, le niveau de pression acoustique ou l'atténuation. Les logarithmes de base dix sont utilisés pour obtenir les valeurs numériques de grandeurs exprimées en bels. Le sous-multiple décibel, dB, est d'usage courant. Pour de plus amples informations, voir la norme internationale ISO 31.

(h) Il est spécialement important de préciser la grandeur en question lorsque l'on utilise ces unités. Il ne faut pas compter sur l'unité pour spécifier la grandeur.

(i) Np figure entre parenthèses parce que, bien que le neper soit cohérent avec le SI, il n'a pas encore été adopté par la Conférence générale.

Le tableau 7 mentionne trois unités en dehors du SI en usage avec le SI, dont la valeur exprimée en unités SI est obtenue expérimentalement et n'est donc pas connue exactement. Ces valeurs sont accompagnées entre parenthèses de l'incertitude-type composée (facteur  $k = 1$ ) sur les deux derniers chiffres. Ces unités sont d'usage courant dans certains domaines spécialisés.

**Tableau 7. Unités en dehors du SI en usage avec le Système international dont la valeur en unités SI est obtenue expérimentalement**

Nom	Symbole	Définition	Valeur en unités SI
électronvolt <sup>(a)</sup>	eV	<sup>(b)</sup>	1 eV = 1,602 177 33 (49) × 10 <sup>-19</sup> J
unité de masse atomique unifiée <sup>(a)</sup>	u	<sup>(c)</sup>	1 u = 1,660 540 2 (10) × 10 <sup>-27</sup> kg
unité astronomique <sup>(a)</sup>	ua	<sup>(d)</sup>	1 ua = 1,495 978 706 91 (30) × 10 <sup>11</sup> m

(a) Les valeurs de l'électronvolt et de l'unité de masse atomique unifiée sont données dans *CODATA Bulletin*, 1986, n° 63.

La valeur de l'unité astronomique est donnée dans IERS Conventions (1996), D.D. McCarthy ed., *IERS Technical Note 21*, Observatoire de Paris, juillet 1996.

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

(c) L'unité de masse atomique unifiée est égale à 1/12 de la masse d'un atome du nucléide <sup>12</sup>C, non lié, au repos, et dans son état fondamental. Dans le domaine de la biochimie, l'unité de masse atomique unifiée est aussi appelée dalton, symbole Da.

(d) L'unité astronomique est une unité de longueur; sa valeur est à peu près égale à la distance moyenne entre la Terre et le soleil. Elle est telle que, lorsqu'elle est utilisée pour décrire les mouvements des corps dans le système solaire, la constante gravitationnelle héliocentrique est de (0,017 202 09895)<sup>2</sup> ua<sup>3</sup> · d<sup>-2</sup>.

Le tableau 8 mentionne d'autres unités en dehors du SI utilisées de manière courante avec le SI, afin de répondre à des besoins spécifiques dans le domaine commercial ou juridique, ou à des intérêts scientifiques particuliers. L'équivalence de ces unités avec les unités SI doit être mentionnée dans tous les documents où elles sont utilisées. Il est préférable d'éviter de les employer.

**Tableau 8. Autres unités en dehors du SI en usage avec le Système international**

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
mille marin <sup>(a)</sup>		1 mille marin = 1852 m
nœud		1 mille marin par heure = (1852/3600) m/s
are <sup>(b)</sup>	a	1 a = 1 dam <sup>2</sup> = 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
hectare <sup>(b)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
bar <sup>(c)</sup>	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 <sup>5</sup> Pa
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 <sup>-10</sup> m
barn <sup>(d)</sup>	b	1 b = 100 fm <sup>2</sup> = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

- (a) Le mille marin est une unité spéciale employée en navigation maritime et aérienne pour exprimer la distance. Cette valeur fut adoptée par convention par la Première Conférence hydrographique internationale extraordinaire, Monaco, 1929, sous le nom de « mille marin international». Il n'existe pas de symbole convenu au niveau international. À l'origine, cette unité avait été choisie parce qu'un mille marin à la surface de la Terre est intercepté approximativement par une minute d'angle au centre de la Terre.
- (b) Les unités are et hectare et leurs symboles furent adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41) et sont utilisés pour exprimer des superficies agraires.
- (c) Le bar et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9<sup>e</sup> CGPM (1948 ; CR, 70).
- (d) Le barn est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer les sections efficaces.

## 4.2 Autres unités en dehors du SI

Certaines unités en dehors du SI continuent à être employées occasionnellement. Certaines d'entre elles sont importantes pour l'interprétation d'anciens textes scientifiques. Elles sont mentionnées aux tableaux 9 et 10, mais il est préférable d'éviter de les employer.

Le tableau 9 donne les relations entre les unités CGS et les unités SI ; il mentionne les unités CGS ayant des noms spéciaux. Dans le domaine de la mécanique, le système d'unités CGS était fondé sur trois grandeurs et leurs unités de base : le centimètre, le gramme et la seconde. Dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, les unités étaient aussi exprimées en fonction de ces trois unités de base. Ces unités pouvant être exprimées de différentes façons, plusieurs systèmes différents ont été établis, par exemple le Système CGS électrostatique, le Système CGS électromagnétique et le Système CGS de Gauss. Dans ces trois derniers systèmes, le système de grandeurs et le système d'équations correspondant sont différents de ceux que l'on utilise avec les unités SI.

**Tableau 9. Unités CGS dérivées ayant des noms spéciaux**

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
erg <sup>(a)</sup>	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J
dyne <sup>(a)</sup>	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
poise <sup>(a)</sup>	P	1 P = 1 dyn · s/cm <sup>2</sup> = 0,1 Pa · s
stokes	St	1 St = 1 cm <sup>2</sup> /s = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
gauss <sup>(b)</sup>	G	1 G = 10 <sup>-4</sup> T
œrsted <sup>(b)</sup>	Oe	1 Oe = (1000/4π) A/m
maxwell <sup>(b)</sup>	Mx	1 Mx = 10 <sup>-8</sup> Wb
stilb <sup>(a)</sup>	sb	1 sb = 1 cd/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
phot	ph	1 ph = 10 <sup>4</sup> lx
gal <sup>(c)</sup>	Gal	1 Gal = 1 cm/s <sup>2</sup> = 10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

(a) Cette unité et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9<sup>e</sup> CGPM (1948 ; CR, 70).

(b) Cette unité fait partie du Système CGS « électromagnétique » à trois dimensions et ne peut pas être comparée strictement à l'unité correspondante du Système international qui est à quatre dimensions lorsqu'on se limite aux grandeurs mécaniques et électriques. C'est pourquoi la relation entre cette unité et l'unité SI est exprimée à l'aide du symbole mathématique « correspond à » (^).

(c) Le gal est une unité spéciale employée en géodésie et en géophysique pour exprimer l'accélération due à la pesanteur.



Le tableau 10 concerne les unités d'usage courant dans les textes anciens. Il est préférable de les éviter dans les textes actuels si l'on ne veut pas perdre les avantages du SI. Chaque fois que ces unités sont mentionnées dans un document, il convient de préciser leur équivalence avec les unités SI.

**Tableau 10. Exemples d'autres unités en dehors du Système international**

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
curie <sup>(a)</sup>	Ci	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
röntgen <sup>(b)</sup>	R	1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg
rad <sup>(c,f)</sup>	rad	1 rad = 1 cGy = $10^{-2}$ Gy
rem <sup>(d,f)</sup>	rem	1 rem = 1 cSv = $10^{-2}$ Sv
unité X <sup>(e)</sup>		1 unité X $\approx 1,002 \times 10^{-4}$ nm
gamma <sup>(f)</sup>	$\gamma$	1 $\gamma$ = 1 nT = $10^{-9}$ T
jansky	Jy	1 Jy = $10^{-26}$ W · m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
fermi <sup>(f)</sup>		1 fermi = 1 fm = $10^{-15}$ m
carat métrique <sup>(g)</sup>		1 carat métrique = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg
torr	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
atmosphère normale	atm <sup>(h)</sup>	1 atm = 101 325 Pa
calorie	cal	<sup>(i)</sup>
micron <sup>(f)</sup>	$\mu$ <sup>(j)</sup>	1 $\mu$ = 1 $\mu$ m = $10^{-6}$ m

- (a) Le curie est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer l'activité des radionucléides (12<sup>e</sup> CGPM, 1964, Résolution 7 ; CR,94).
- (b) Le röntgen est une unité spéciale employée pour exprimer l'exposition aux rayonnements x ou  $\gamma$ .
- (c) Le rad est une unité spéciale employée pour exprimer la dose absorbée de rayonnements ionisants. Lorsqu'il y a un risque de confusion avec le symbole du radian, on peut utiliser rd comme symbole du rad.
- (d) Le rem est une unité spéciale employée en radioprotection pour exprimer l'équivalent de dose.
- (e) L'unité X était employée pour exprimer les longueurs d'onde des rayons x. Son équivalence avec l'unité SI est approximative.
- (f) Cette unité en dehors du SI est exactement équivalente à un sous-multiple décimal d'une unité SI.
- (g) Le carat métrique fut adopté par la 4<sup>e</sup> CGPM en 1907 (CR, 89-91) pour le commerce des diamants, perles fines et pierres précieuses.
- (h) Résolution 4 de la 10<sup>e</sup> CGPM (1954 ; CR,79). La désignation « atmosphère normale » reste admise pour la pression de référence de 101 325 Pa.
- (i) Plusieurs calories ont été en usage :
- calorie dite « à 15 °C » : 1 cal<sub>15</sub> = 4,1855 J (valeur adoptée par le Comité international en 1950 ; PV, 1950, 22, 79-80) ;
  - calorie dite « IT » (International Table) : 1 cal<sub>IT</sub> = 4,1868 J (5th International Conference on Properties of Steam, Londres, 1956) ;
  - calorie dite « thermochimique » : 1 cal<sub>th</sub> = 4,184 J.
- (j) Le micron et son symbole, qui furent adoptés par le Comité international en 1879 (PV, 1879, 41) et repris dans la Résolution 7 de la 9<sup>e</sup> CGPM (1948 ; CR,70), ont été supprimés par la 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 7 ; CR,105 et *Metrologia*, 1968, 4, 44).

## 5 Règles d'écriture des noms et symboles des unités SI

### 5.1 Principes généraux

Les principes généraux concernant l'écriture des symboles des unités et des nombres furent d'abord proposés par la 9<sup>e</sup> CGPM (1948, Résolution 7). Ils furent ensuite adoptés et mis en forme par l'ISO/TC 12 (ISO 31, *Grandeurs et unités*).

### 5.2 Symboles des unités SI

Les symboles d'unités SI (et bien d'autres symboles d'unités en dehors du SI) doivent être écrits selon les règles suivantes :

1. Les symboles des unités sont imprimés en caractères romains (droits).  
En général les symboles des unités sont écrits en minuscules, mais, si le nom de l'unité dérive d'un nom propre, la première lettre du symbole est majuscule. Le nom de l'unité proprement dit commence toujours par une minuscule, sauf s'il s'agit du premier mot d'une phrase ou du nom « degré Celsius ».
2. Les symboles des unités restent invariables au pluriel.
3. Les symboles des unités ne sont pas suivis d'un point, sauf s'ils se trouvent placés à la fin d'une phrase, le point relevant dans ce cas de la ponctuation habituelle.

### 5.3 Expression algébrique des symboles d'unités SI

En accord avec les principes généraux adoptés par l'ISO/TC 12 (ISO 31), le Comité international recommande que les expressions algébriques comprenant des symboles d'unités SI soient exprimées sous une forme normalisée.

1. Quand une unité dérivée est formée en multipliant deux ou plusieurs unités, elle est exprimée à l'aide de symboles d'unités séparés par des points à mi-hauteur ou par un espace.

*Par exemple* : N · m      ou      N m.

2. Quand une unité dérivée est formée en divisant une unité par une autre, on peut utiliser une barre oblique (/), une barre horizontale ou bien des exposants négatifs.

*Par exemple* : m/s      ou       $\frac{\text{m}}{\text{s}}$       ou      m · s<sup>-1</sup>.

3. On ne doit jamais faire suivre sur une même ligne une barre oblique d'un signe de multiplication ou de division, à moins que des parenthèses soient ajoutées afin d'éviter toute ambiguïté. Dans les cas compliqués, des exposants négatifs ou des parenthèses doivent être utilisés pour éviter toute ambiguïté.

*Par exemple :*  $m/s^2$                     ou     $m \cdot s^{-2}$                     *mais pas*     $m/s/s$   
 $m \cdot kg/(s^3 \cdot A)$     ou     $m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$  *ni*                     $m \cdot kg/s^3/A$   
*ni*                     $m \cdot kg/s^3 \cdot A.$

## 5.4 Règles d'emploi des préfixes SI

En accord avec les principes généraux adoptés par l'ISO (ISO 31), le Comité international recommande que l'on observe les règles suivantes dans l'emploi des préfixes SI :

1. Les symboles des préfixes sont imprimés en caractères romains (droits), sans espace entre le symbole du préfixe et le symbole de l'unité.
2. L'ensemble formé par le symbole d'un préfixe accolé au symbole d'une unité constitue un nouveau symbole inséparable (symbole d'un multiple ou sous-multiple de cette unité) qu'on peut élever à une puissance positive ou négative et combiner avec d'autres symboles d'unités pour former des symboles d'unités composées.

*Par exemple :*

$$1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ } \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

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

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

3. On ne doit pas utiliser de préfixes composés, c'est-à-dire formés par la juxtaposition de plusieurs préfixes.

*Par exemple :* 1 nm                    *mais pas* 1 mµm.

4. Un préfixe ne doit jamais être employé seul.

*Par exemple :*  $10^6/m^3$                     *mais pas*  $M/m^3.$

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

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

Le SI n'est pas une convention 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 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.

### 1. Décisions relatives à l'établissement du Système international d'unités, SI

#### 1.1 Système pratique d'unités : établissement du SI

##### ■ 9<sup>e</sup> CGPM, 1948, Résolution 6 (CR, 64) : proposition d'établissement d'un système pratique d'unités de mesure

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.

■ **10<sup>e</sup> CGPM, 1954, Résolution 6 (CR, 80) : système pratique d'unités de mesure\***

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 (voir 13<sup>e</sup> CGPM, Résolution 3, p. 48).

## 1.2 Le SI

■ **CIPM, 1956, Résolution 3 (PV, 25, 83) : Système international d'unités**

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, Résolution 12 (CR, 87) : Système international d'unités\***

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

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

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

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

**décide**

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

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>	tera T	0,1 = 10 <sup>-1</sup>	deci d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	giga G	0,01 = 10 <sup>-2</sup>	centi c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	mega M	0,001 = 10 <sup>-3</sup>	milli m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	kilo k	0,000 001 = 10 <sup>-6</sup>	micro μ
100 = 10 <sup>2</sup>	hecto h	0,000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	nano n
10 = 10 <sup>1</sup>	deca da	0,000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	pico p

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

**Unités supplémentaires**

angle	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

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

Le nom et le symbole de l'unité de température thermodynamique ont été modifiés par la 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 3, voir p. 48).

Une septième unité de base, la mole, fut adoptée par la 14<sup>e</sup> CGPM (1971, Résolution 3, voir p. 48).

D'autres préfixes furent adoptés par les 12<sup>e</sup> CGPM (1964, Résolution 8, voir p. 53), par la 15<sup>e</sup> CGPM (1975, Résolution 10, voir p. 54) et par la 19<sup>e</sup> CGPM (1991, Résolution 4, voir p. 54).

La 20<sup>e</sup> Conférence générale a abrogé la classe des unités supplémentaires dans le SI (1995, Résolution 8, voir p. 53). Ces unités sont maintenant considérées comme des unités dérivées.

**Unités dérivées**

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

La 13<sup>e</sup> CGPM (1967-1968, Résolution 6, voir p. 50) a ajouté d'autres unités à cette liste d'unités dérivées, qui, en principe, n'est pas limitative.

■ **CIPM, 1969, Recommandation 1 (PV, 37, 30 et *Metrologia*, 1970, 6, 66) : Système international d'unités, modalités d'application de la Résolution 12 de la 11<sup>e</sup> CGPM (1960)\***

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 » ;

\* La 20<sup>e</sup> CGPM (1995, Résolution 8, voir p. 53) a décidé d'abroger la classe des unités supplémentaires dans le SI.

et **recommande**

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

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

## 2 Décisions relatives aux unités de base du Système international

### 2.1 Longueur

#### ■ 1<sup>re</sup> CGPM, 1889 (CR, 34-38) : sanction des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme\*

La Conférence générale,

##### considérant

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

##### sanctionne

A. En ce qui concerne les prototypes internationaux :

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

B. En ce qui concerne les prototypes nationaux :

...

\* La définition du mètre a été abrogée en 1960 (voir 11<sup>e</sup> CGPM, Résolution 6, ci-dessous).



■ **7<sup>e</sup> CGPM, 1927 (CR, 49) : définition du mètre par le Prototype international\***

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 (voir 11<sup>e</sup> CGPM, Résolution 6, ci-dessous).

■ **11<sup>e</sup> CGPM, 1960, Résolution 6 (CR, 85) : définition du mètre\***

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 (voir 17<sup>e</sup> CGPM, Résolution 1, ci-dessous).

■ **15<sup>e</sup> CGPM, 1975, Résolution 2 (CR, 103 et *Metrologia*, 1975, 11, 179-180) : valeur recommandée pour la vitesse de la lumière**

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.

■ **17<sup>e</sup> CGPM, 1983, Résolution 1 (CR, 97 et *Metrologia*, 1984, 20, 25) : définition du mètre**

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,

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

#### décide

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

#### ■ 17<sup>e</sup> CGPM, 1983, Résolution 2 (CR, 98 et *Metrologia*, 1984, 20, 25-26) : sur la mise en pratique de la définition du mètre

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.

Voir Recommandation 1 (CI-1997) du Comité international relative à la révision de la mise en pratique de la définition du mètre (Annexe 2, p. 58).

## 2.2 Masse

### ■ 1<sup>re</sup> CGPM, 1889 (CR, 34-38) : sanction des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme

(voir p. 39)

### ■ 3<sup>e</sup> CGPM, 1901 (CR, 70) : déclaration relative à l'unité de masse et à la définition du poids ; valeur conventionnelle de $g_n$

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

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

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

#### La Conférence déclare :

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

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

### ■ CIPM, 1967, Recommandation 2 (PV, 35, 29 et *Metrologia*, 1968, 4, 45) : multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse

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 ».

## 2.3 Temps

### ■ CIPM, 1956, Résolution 1 (PV, 25, 77) : définition de l'unité de temps (seconde)\*

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

\* Définition abrogée en 1967 (voir 13<sup>e</sup> CGPM, Résolution 1, ci-dessous).

(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

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

**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.

■ **11<sup>e</sup> CGPM, 1960, Résolution 9 (CR, 86) : définition de l'unité de temps (seconde)\***

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

**considérant**

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

**ratifie** la définition suivante :

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

\* Définition  
abrogée en 1967  
(voir 13<sup>e</sup> CGPM,  
Résolution 1,  
ci-dessous).

■ **12<sup>e</sup> CGPM, 1964, Résolution 5 (CR, 93) : étalon atomique de fréquence**

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.

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

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.

■ **13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 1 (CR, 103 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) : unité SI de temps (seconde)**

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 thermodynamique de 0 K.

■ **14<sup>e</sup> CGPM, 1971, Résolution 1 (CR, 77 et *Metrologia*, 1972, 8, 35) : Temps atomique international ; rôle du CIPM**

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.

Voir l'annexe 2, p. 68, pour ce qui concerne les recommandations du CIPM et du CCDS (renommé le CCTF) relatives à la définition du Temps atomique international.

#### ■ 15<sup>e</sup> CGPM, 1975, Résolution 5 (CR, 104 et *Metrologia*, 1975, 11, 180) : Temps universel coordonné (UTC)

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.

## 2.4 Courant électrique

#### ■ CIPM, 1946, Résolution 2 (PV, 20, 129-137) : définitions des unités électriques

...

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.

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

**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.

#### ■ 14<sup>e</sup> CGPM, 1971 (CR, 78) : pascal, siemens

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).

## 2.5 Température thermodynamique

### ■ 9<sup>e</sup> CGPM, 1948, Résolution 3 (CR, 55 et 63) : point triple de l'eau ; échelle thermodynamique à un seul point fixe ; unité de quantité de chaleur (joule)

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

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

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

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

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

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

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

#### ■ CIPM, 1948 (PV, 21, 88) et 9<sup>e</sup> CGPM, 1948 (CR, 64) : adoption de « degré Celsius »

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).

#### ■ 10<sup>e</sup> CGPM, 1954, Résolution 3 (CR, 79) : définition de l'échelle thermodynamique de température\*

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 (1967-1968, Résolution 4, ci-dessous) a explicitement défini le kelvin.

#### ■ 10<sup>e</sup> CGPM, 1954, Résolution 4 (CR, 79) : définition de l'atmosphère normale

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.



■ **13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 3 (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) : unité SI de température thermodynamique (kelvin)\***

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,

**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.

■ **13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 4 (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43) : définition de l'unité SI de température thermodynamique (kelvin)\***

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. »

\* 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.

\* Voir la Recommandation 5 (CI-1989) du CIPM relative à l'Échelle internationale de température de 1990 (Annexe 2, p. 73).

## 2.6 Quantité de matière

■ **14<sup>e</sup> CGPM, 1971, Résolution 3 (CR, 78 et *Metrologia*, 1972, 8, 36) : unité SI de quantité de matière (mole)\***

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,

\* 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.

**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.

**2.7 Intensité lumineuse****■ CIPM, 1946, Résolution (PV, 20, 119-122) : définition des unités photométriques\***

...

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. ...

**■ 13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 5 (CR, 104 et *Metrologia*, 1968, 4, 43-44) : unité SI d'intensité lumineuse (candela)\***

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. »

**■ 16<sup>e</sup> CGPM, 1979, Résolution 3 (CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56) : unité SI d'intensité lumineuse (candela)**

La Seizième Conférence générale des poids et mesures,

**considérant**

- que, malgré les efforts méritoires de quelques laboratoires, il subsiste des

\* Les deux définitions contenues dans cette Résolution furent ratifiées par la 9<sup>e</sup> CGPM (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 (1967-1968, Résolution 5, ci-dessous).

\* Définition abrogée par la 16<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 3, ci-dessous).

divergences excessives entre les résultats de la réalisation de la candela à l'aide du corps noir étalon primaire actuel,

- que les techniques radiométriques se développent rapidement, autorisant des précisions qui sont déjà analogues à celles de la photométrie et que ces techniques sont déjà en usage dans des laboratoires nationaux pour réaliser la candela sans avoir à construire un corps noir,
- que la relation entre les grandeurs lumineuses de la photométrie et les grandeurs énergétiques, à savoir la valeur 683 lumens par watt pour l'efficacité lumineuse spectrale de la radiation monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  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.

## 3 Décisions relatives aux unités SI dérivées et supplémentaires

### 3.1 Unités SI dérivées

#### ■ 12<sup>e</sup> CGPM, 1964, Résolution 7 (CR, 94) : curie\*

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, **reconnaisant** 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 (1975, Résolution 8, ci-dessous) pour l'unité SI d'activité :  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

#### ■ 13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 6 (CR, 105 et *Metrologia*, 1968, 4, 44) : unités SI dérivées\*

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 (1975, Résolution 8, ci-dessous).

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	$s^{-1}$

■ **15<sup>e</sup> CGPM, 1975, Résolutions 8 et 9 (CR, 105 et *Metrologia*, 1975, 11, 180) : unités SI pour les rayonnements ionisants (becquerel, gray)\***

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).

\* 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.

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.

■ **16<sup>e</sup> CGPM, 1979, Résolution 5 (CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56) : nom spécial pour l'unité SI d'équivalent de dose (sievert)\***

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.

\* Le Comité international (1984, Recommandation 1) a décidé d'accompagner cette Résolution de l'explication ci-dessous.

■ **CIPM, 1984, Recommandation 1 (PV, 52, 31 et *Metrologia*, 1985, 21, 90) : au sujet du sievert**

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  $H$ .

### 3.2 Unités SI supplémentaires

■ **CIPM, 1980, Recommandation 1 (PV, 48, 24 et *Metrologia*, 1981, 17, 72) : unités SI supplémentaires (radian et stéradian)\***

Le Comité international des poids et mesures (CIPM),

**prenant en considération** la Résolution 3 adoptée par l'ISO/TC12 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,

\* La classe des unités supplémentaires dans le SI a été abrogée par décision de la 20<sup>e</sup> CGPM (1995, Résolution 8, ci-dessous).

- 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.

■ **20<sup>e</sup> CGPM, 1995, Résolution 8 (CR, 121 et *Metrologia*, 1996, 33, 83) : suppression de la classe des unités supplémentaires dans le SI**

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.

## 4 Décisions relatives à la terminologie et aux unités en usage avec le SI

### 4.1 Préfixes SI

■ **12<sup>e</sup> CGPM, 1964, Résolution 8 (CR, 94) : préfixes SI femto et atto\***

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 (1975, Résolution 10, ci-dessous).

■ **15<sup>e</sup> CGPM, 1975, Résolution 10** (CR, 106 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180-181) : **préfixes SI peta et exa\***

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

■ **19<sup>e</sup> CGPM, 1991, Résolution 4** (CR, 97 et *Metrologia*, 1992, **29**, 3) : **préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto**

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
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

## 4.2 Symboles d'unités et nombres

■ **9<sup>e</sup> CGPM, 1948, Résolution 7** (CR, 70) : **écriture des symboles d'unités et des nombres\***

### 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.

\* De nouveaux préfixes furent ajoutés par la 19<sup>e</sup> CGPM (1991, Résolution 4, ci-dessous).

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

\* 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 (1967-1968, Résolutions 7 et 3, voir ci-dessous et p. 48), ainsi qu'au litre, 16<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 6, voir p. 56).

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 ».

### 4.3 Noms d'unités

#### ■ 13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968, Résolution 7 (CR, 105 et *Metrologia*, 1968, 4, 44) : abrogation de décisions antérieures (micron, bougie nouvelle)

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

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

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



#### 4.4 Unités en usage avec le SI ; un exemple : le litre

##### ■ 3<sup>e</sup> CGPM, 1901 (CR, 38-39) : déclaration concernant la définition du litre\*

...

##### La Conférence déclare :

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

\* Définition abrogée par la 12<sup>e</sup> CGPM (1964, Résolution 6, ci-dessous).

##### ■ 11<sup>e</sup> CGPM, 1960, Résolution 13 (CR, 88) : décimètre cube et litre

La Onzième Conférence générale des poids et mesures,

##### considérant

- que le décimètre cube et le litre sont inégaux et différent d'environ 28 millièmes,
- que les déterminations de grandeurs physiques impliquant des mesures de volume ont une précision de plus en plus élevée, aggravant par là les conséquences d'une confusion possible entre le décimètre cube et le litre,

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

##### ■ CIPM, 1961, Recommandation (PV, 29, 34) : décimètre cube et litre

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.

##### ■ 12<sup>e</sup> CGPM, 1964, Résolution 6 (CR, 93) : litre

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.

##### ■ 16<sup>e</sup> CGPM, 1979, Résolution 6 (CR, 101 et *Metrologia*, 1980, 16, 56-57) : symboles du litre

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,

**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.

## Annexe 2. Mise en pratique des définitions des principales unités

Cette annexe concerne la mise en pratique des définitions des principales unités du SI. Elle mentionne les décisions de la Conférence générale et du Comité international relatives à la réalisation actuelle des unités et présente le cadre dans lequel les laboratoires de métrologie doivent travailler pour que les unités qu'ils réalisent soient conformes aux unités SI.

### 1 Longueur

Le Comité international des poids et mesures (CIPM) a adopté en 1997 la Recommandation 1 (CI-1997) qui précise et actualise les règles de mise en pratique de la définition du mètre :

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 CGPM a invité le Comité international des poids et mesures (CIPM)
  - 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 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,

Il est habituel d'utiliser la notation  $c_0$  pour la vitesse de la lumière dans le vide (ISO 31). La notation  $c$  avait été utilisée dans le texte d'origine de la Recommandation de 1983.

- 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 le CIPM avait recommandé une liste de radiations à cet effet ;

**rappelant** aussi qu'en 1992 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 1992, 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 faibles incertitudes ;
- que ces travaux ont aussi permis de réduire sensiblement l'incertitude sur la valeur de la fréquence et de la longueur d'onde dans le vide de l'une des radiations recommandées antérieurement ;
- qu'une mise à jour de la liste des radiations recommandées est souhaitable en vue de diverses applications qui comprennent non seulement la réalisation directe du mètre, impliquant l'interférométrie optique pour la mesure pratique des longueurs, mais aussi la spectroscopie, la physique atomique et moléculaire et la détermination de constantes physiques fondamentales ;

**recommande**

- que la liste des radiations recommandées donnée par le CIPM en 1992 (Recommandation 3 (CI-1992)) soit remplacée par la liste de radiations donnée ci-dessous ;
- que la note suivante au sujet de la relativité générale soit ajoutée aux règles pour la réalisation du mètre :

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. 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 CCDS 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).

## Liste des radiations recommandées pour la réalisation du mètre approuvées par le CIPM en 1997 : fréquences et longueurs d'onde dans le vide

Cette liste remplace celles qui avaient été publiées dans PV, 1983, **51**, 25-28, 1992, **60**, 141-144 et dans *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166, 1993-1994, **30**, 523-541.

Dans cette liste, les valeurs de la fréquence  $f$  et de la longueur d'onde  $\lambda$  devraient être rigoureusement liées par la relation  $\lambda f = c_0$ , avec  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, mais les valeurs de  $\lambda$  sont arrondies.

Les résultats de mesures qui ont été utilisés pour la compilation de cette liste, et leur analyse, sont donnés dans l'annexe : Données utilisées pour établir la liste des radiations recommandées, 1997, et Bibliographie commentée.

Il faut noter que, pour plusieurs de ces radiations recommandées, nous ne disposons que de peu de valeurs indépendantes ; il en résulte que les incertitudes estimées peuvent ne pas refléter toutes les sources de variations possibles.

Chacune de ces radiations peut être remplacée, sans perte d'exactitude, par une radiation correspondant à une autre composante de la même transition, ou par une autre radiation, lorsque la différence de fréquence correspondante est connue avec une exactitude suffisante. Il faut aussi noter que, pour obtenir les incertitudes données dans cette liste, il n'est pas suffisant de remplir les conditions requises pour les paramètres mentionnés ; il faut en outre respecter les conditions expérimentales considérées comme les plus appropriées selon la méthode d'asservissement utilisée. Celles-ci sont décrites dans de nombreuses publications scientifiques ou techniques. Des exemples de conditions expérimentales considérées comme convenables pour telle ou telle radiation sont décrits dans des publications dont les références peuvent être obtenues auprès des laboratoires membres du CCDM ou auprès du BIPM.

### 1. Radiations recommandées de lasers asservis

#### 1.1 Atome absorbant $^1\text{H}$ , transition 1S-2S à deux photons

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs} \quad f &= 1\,233\,030\,706\,593,7 \text{ kHz} \\ \lambda &= 243\,134\,624,6260 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude-type relative de  $8,5 \times 10^{-13}$ , s'appliquent à une radiation asservie sur une transition à deux photons dans un faisceau d'hydrogène refroidi. Les valeurs sont corrigées pour les ramener à une puissance laser nulle et pour tenir compte du déplacement Doppler de second ordre, ce qui ramène à des atomes réellement stationnaires.

On peut aussi utiliser d'autres transitions absorbantes dans l'hydrogène, ces transitions sont données dans l'annexe M 3 du rapport du CCDM (1997) .

#### 1.2 Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$ , transition 43-0, P(13), composante $a_3$ (ou s)

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs} \quad f &= 582\,490\,603,37 \text{ MHz} \\ \lambda &= 514\,673\,466,4 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude-type relative de  $2,5 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise

Pour consulter cette annexe, voir le rapport du CCDM (1997).

Lors de sa session de 1997, le CIPM a changé le nom du Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) en Comité consultatif des longueurs (CCL).

par un laser à Ar<sup>+</sup> asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $(-5 \pm 2)$  °C.

**1.3** Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 32-0, R(56), composante  $a_{10}$

Les valeurs  $f = 563\,260\,223,48$  MHz

$\lambda = 532\,245\,036,14$  fm

avec une incertitude-type relative de  $7 \times 10^{-11}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser Nd : YAG à fréquence doublée asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à une température située entre  $-10$  °C et  $-20$  °C.

On peut aussi utiliser d'autres transitions absorbantes de  $^{127}\text{I}_2$  proches de cette transition, en faisant référence aux différences de fréquence ci-dessous, dont l'incertitude-type est  $u_c = 2$  kHz.

Longueurs d'onde de transitions de  $^{127}\text{I}_2$

Transition	Différence de fréquence
x	$[f(x) - f(32-0, R(56), a_{10})]/\text{kHz}$
32-0, R(57), $a_1$	-50 946 880,4
32-0, P(54), $a_1$	-47 588 892,5
35-0, P(119), $a_1$	-36 840 161,5
33-0, R(86), $a_1$	-32 190 404,0
34-0, R(106), $a_1$	-30 434 761,5
36-0, R(134), $a_1$	-17 173 680,4
33-0, P(83), $a_{21}$	-15 682 074,1
32-0, R(56), $a_{10}$	0
32-0, P(53), $a_1$	+2 599 708,0

Ici,  $f(x)$  représente la fréquence de la transition dénommée x et  $f(32-0, R(56), a_{10})$  la fréquence de la transition de référence.

**1.4** Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 26-0, R(12), composante  $a_9$

Les valeurs  $f = 551\,579\,482,96$  MHz

$\lambda = 543\,516\,333,1$  fm

avec une incertitude-type relative de  $2,5 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $(0 \pm 2)$  °C.

**1.5** Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 9-2, R(47), composante  $a_7$  (ou o)

Les valeurs  $f = 489\,880\,354,9$  MHz

$\lambda = 611\,970\,770,0$  fm

avec une incertitude-type relative de  $3 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $(-5 \pm 2)$  °C.

**1.6** Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 11-5, R(127), composante  $a_{13}$  (ou i)

Les valeurs  $f = 473\,612\,214\,705$  kHz

$\lambda = 632\,991\,398,22$  fm

Pour ce qui concerne la spécification des conditions de mise en œuvre, telles que la température, la largeur de modulation et la puissance du laser, le symbole  $\pm$  fait référence à une tolérance et non pas à une incertitude.

avec une incertitude-type relative de  $2,5 \times 10^{-11}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi par la technique du troisième harmonique à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur du laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- température des parois de la cuve :  $(25 \pm 5)$  °C ;
- point froid à la température de :  $(15 \pm 0,2)$  °C ;
- modulation de fréquence, crête à creux :  $(6 \pm 0,3)$  MHz ;
- puissance transportée par le faisceau dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité (c'est-à-dire puissance de sortie divisée par le facteur de transmission du miroir de sortie) :  $(10 \pm 5)$  mW pour une valeur absolue du coefficient de décalage en fonction de la puissance  $\leq 1,4$  kHz/mW.

Ces conditions ne suffisent pas par elles-mêmes à garantir l'obtention de l'incertitude-type indiquée. Il faut en outre que les parties optique et électronique du système d'asservissement fonctionnent avec les performances appropriées. La cuve à iode peut aussi être utilisée dans des conditions moins rigoureuses, ce qui conduit à l'incertitude plus grande donnée dans l'Annexe M 2 du rapport du CCDM (1997).

**1.7** Molécule absorbante  $^{127}\text{I}_2$ , transition 8-5, P(10), composante  $a_9$  (ou g)

Les valeurs  $f = 468\,218\,332,4$  MHz

$\lambda = 640\,283\,468,7$  fm

avec une incertitude-type relative de  $4,5 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $(16 \pm 1)$  °C, avec une amplitude de modulation de fréquence, crête à creux, de  $(6 \pm 1)$  MHz.

**1.8** Atome absorbant  $^{40}\text{Ca}$ , transition  $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ ;  $\Delta m_J = 0$

Les valeurs  $f = 455\,986\,240\,494,15$  kHz

$\lambda = 657\,459\,439,2917$  fm

avec une incertitude-type relative de  $6 \times 10^{-13}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser asservi à l'aide d'atomes de Ca. Ces valeurs correspondent à la fréquence moyenne des deux composantes de recul d'atomes réellement stationnaires, c'est-à-dire qu'elles sont corrigées pour tenir compte du déplacement Doppler du second ordre.

**1.9** Ion absorbant  $^{88}\text{Sr}^+$ , transition  $5^2\text{S}_{1/2} - 4^2\text{D}_{5/2}$

Les valeurs  $f = 444\,779\,044,04$  MHz

$\lambda = 674\,025\,590,95$  fm

avec une incertitude-type relative de  $1,3 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser asservi sur la transition que l'on observe à l'aide d'un ion de strontium piégé et refroidi. Les valeurs correspondent au centre du multiplet Zeeman.

**1.10** Atome absorbant  $^{85}\text{Rb}$ , transition  $5\text{S}_{1/2} (F = 3) - 5\text{D}_{5/2} (F = 5)$  à deux photons

Les valeurs  $f = 385\,285\,142\,378$  kHz

$\lambda = 778\,105\,421,22$  fm

avec une incertitude-type relative de  $1,3 \times 10^{-11}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser asservi sur le centre de la transition à deux photons. Les valeurs s'appli-

quent à une cuve à rubidium à une température inférieure à 100 °C ; elles sont corrigées pour une puissance laser nulle et pour tenir compte du déplacement Doppler du second ordre.

D'autres transitions absorbantes du rubidium peuvent aussi être utilisées, elles sont données à l'annexe M 3 du rapport du CCDM (1997).

**1.11** Molécule absorbante CH<sub>4</sub>, transition ν<sub>3</sub>, P(7), composante F<sub>2</sub><sup>(2)</sup>

1.11.1 Les valeurs  $f = 88\,376\,181\,600,18$  kHz  
 $\lambda = 3\,392\,231\,397,327$  fm

avec une incertitude-type relative de  $3 \times 10^{-12}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide de la composante centrale [transition (7-6)] du triplet de structure hyperfine résolu. Ces valeurs correspondent à la fréquence moyenne des deux composantes de recul de molécules réellement stationnaires, c'est-à-dire qu'elles sont corrigées pour tenir compte du déplacement Doppler du second ordre.

1.11.2 Les valeurs  $f = 88\,376\,181\,600,5$  kHz  
 $\lambda = 3\,392\,231\,397,31$  fm

avec une incertitude-type relative de  $2,3 \times 10^{-11}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi sur le centre de la structure hyperfine non résolue, à l'aide d'une cuve à méthane, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, à la température ambiante, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- pression du méthane  $\leq 3$  Pa ;
- puissance surfacique moyenne transportée par le faisceau dans un seul sens (c'est-à-dire puissance surfacique de sortie divisée par le facteur de transmission du miroir de sortie), à l'intérieur de la cavité  $\leq 10^4$  W m<sup>-2</sup> ;
- rayon de courbure des surfaces d'onde  $\geq 1$  m ;
- différence relative de puissance entre les deux ondes qui se propagent en sens inverse l'une de l'autre  $\leq 5\%$  ;
- récepteur d'asservissement placé à la sortie du dispositif du côté du tube à He-Ne.

**1.12** Molécule absorbante OsO<sub>4</sub>, transition en coïncidence avec la raie laser <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, R(12)

Les valeurs  $f = 29\,096\,274\,952,34$  kHz  
 $\lambda = 10\,303\,465\,254,27$  fm

avec une incertitude-type relative de  $6 \times 10^{-12}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à CO<sub>2</sub> asservi sur une cuve à OsO<sub>4</sub>, remplie à une pression inférieure à 0,2 Pa, située à l'extérieur du laser.

On peut utiliser d'autres transitions ; elles sont données à l'annexe M 3 du rapport du CCDM (1997).

**2. Valeurs recommandées de radiations de lampes spectrales et autres sources**

**2.1** Radiation correspondant à la transition entre les niveaux 2p<sub>10</sub> et 5d<sub>5</sub> de l'atome de <sup>86</sup>Kr

La valeur  $\lambda = 605\,780\,210,3$  fm



avec une incertitude relative élargie,  $U = ku_c$  ( $k = 3$ ), de  $4 \times 10^{-9}$  [égale à trois fois l'incertitude-type relative de  $1,3 \times 10^{-9}$ ], s'applique à la radiation émise par une lampe à décharge utilisée dans les conditions recommandées par le CIPM en 1960 (PV, **28**, 71-72 et CR, 1960, 85) ; ces conditions sont les suivantes :

La radiation du krypton 86 est réalisée au moyen d'une lampe à décharge à cathode chaude contenant du krypton 86 d'une pureté non inférieure à 99 %, en quantité suffisante pour assurer la présence de krypton solide à la température de 64 K, cette lampe étant munie d'un capillaire ayant les caractéristiques suivantes : diamètre intérieur 2 mm à 4 mm, épaisseur de la paroi 1 mm environ.

On estime que la longueur d'onde de la radiation émise par la colonne positive est égale, à  $1 \times 10^{-8}$  près en valeur relative, à la longueur d'onde correspondant à la transition entre les niveaux non perturbés, lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

1. le capillaire est observé en bout de façon que les rayons lumineux utilisés cheminent du côté cathodique vers le côté anodique ;
2. la partie inférieure de la lampe, y compris le capillaire, est immergée dans un bain réfrigérant maintenu à la température du point triple de l'azote, à 1 degré près ;
3. la densité du courant dans le capillaire est  $(0,3 \pm 0,1) \text{ A/cm}^2$ .

## 2.2 Radiations des atomes de $^{86}\text{Kr}$ , $^{198}\text{Hg}$ et $^{114}\text{Cd}$

En 1963 le CIPM (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1962, **3**, 18-19 et PV, **52**, 26-27) a recommandé des valeurs de longueurs d'onde dans le vide,  $\lambda$ , et d'incertitudes, pour certaines transitions des atomes de  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  et  $^{114}\text{Cd}$ , ainsi que les conditions d'utilisation suivantes :

Longueurs d'onde dans le vide,  $\lambda$ , de transitions du  $^{86}\text{Kr}$

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$2p_9 - 5d'_4$	645 807,20
$2p_8 - 5d_4$	642 280,06
$1s_3 - 3p_{10}$	565 112,86
$1s_4 - 3p_8$	450 361,62

Pour le  $^{86}\text{Kr}$ , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de  $2 \times 10^{-8}$  en valeur relative, aux radiations émises par une lampe opérant dans des conditions similaires à celles mentionnées précédemment (2.1).

Longueurs d'onde dans le vide,  $\lambda$ , de transitions du  $^{198}\text{Hg}$

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$6^1P_1 - 6^1D_2$	579 226,83
$6^1P_1 - 6^3D_2$	577 119,83
$6^3P_2 - 7^3S_1$	546 227,05
$6^3P_1 - 7^3S_1$	435 956,24

Pour le  $^{198}\text{Hg}$ , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de  $5 \times 10^{-8}$  en valeur relative, aux radiations émises par une lampe à décharge, lorsque les

L'incertitude figurant dans le document de 1960 était de  $1 \times 10^{-8}$ , elle a ensuite été modifiée et portée à  $4 \times 10^{-9}$  (*BIPM Com. cons. déf. mètre*, 1973, **5**, M 12)

Les incertitudes citées dans la section 2.2 correspondent aux incertitudes élargies relatives,  $U = ku_c$  ( $k = 3$ ), égales à trois fois l'incertitude-type relative composée.

conditions suivantes sont observées :

- les radiations sont produites au moyen d'une lampe à décharge sans électrodes contenant du mercure 198 d'une pureté non inférieure à 98 % et de l'argon à une pression comprise entre 0,5 mm Hg et 1,0 mm Hg (66 Pa à 133 Pa) ;
- le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est d'environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- la lampe est excitée par un champ à haute fréquence de puissance modérée ; elle est maintenue à une température inférieure à 10 °C ;
- le volume de la lampe est de préférence supérieur à 20 cm<sup>3</sup>.

Longueurs d'onde dans le vide,  $\lambda$ , de transitions du <sup>114</sup>Cd

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$5^1P_1 - 5^1D_2$	644 024,80
$5^3P_2 - 6^3S_1$	508 723,79
$5^3P_1 - 6^3S_1$	480 125,21
$5^3P_0 - 6^3S_1$	467 945,81

Pour le <sup>114</sup>Cd, les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de  $7 \times 10^{-8}$  en valeur relative, aux radiations émises par une lampe à décharge, lorsque les conditions suivantes sont observées :

- les radiations sont produites par une lampe à décharge sans électrodes, contenant du cadmium 114 d'une pureté non inférieure à 95 %, et de l'argon à une pression 1 mm Hg (133 Pa) environ à la température ambiante ;
- le diamètre intérieur du capillaire de la lampe est environ 5 mm, et les radiations sont observées en travers ;
- la lampe est excitée par un champ à haute fréquence de puissance modérée; elle est maintenue à une température telle que la raie verte ne soit pas renversée.

**2.3** Molécule absorbante <sup>127</sup>I<sub>2</sub>, transition 17-1, P(62) composante a<sub>1</sub>, recommandée par le CIPM en 1992 (*BIPM Com. cons. déf. mètre, 1992, 8*, M18 et M137 et Mise en pratique of the definition of the metre (1992), *Metrologia*, 1993/94, **30**, 523-541).

Les valeurs  $f = 520\,206\,808,4$  MHz

$\lambda = 576\,294\,760,4$  fm

avec une incertitude-type relative de  $4 \times 10^{-10}$ , s'appliquent à la radiation émise par un laser à colorant (ou par un laser à He-Ne associé à un doubleur de fréquence) asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de  $(6 \pm 2)$  °C.

## 2 Masse

L'unité de masse, le kilogramme, est la masse du prototype international du kilogramme conservé au BIPM. C'est un cylindre constitué d'un alliage de 90 % en masse de platine et de 10 % en masse d'iridium. La masse des étalons secondaires du kilogramme, en platine iridié ou en acier inoxydable, est comparée à la masse du prototype international à l'aide de balances dont l'incertitude relative peut atteindre  $1 \times 10^{-9}$ .

L'augmentation relative de la masse du prototype international est d'environ  $1 \times 10^{-9}$  par an en raison de l'accumulation inévitable de polluants à la surface. C'est pourquoi le Comité international a déclaré que, jusqu'à plus ample information, la masse de référence du prototype international est celle qui suit immédiatement le nettoyage-lavage selon une méthode spécifique (PV, 1989, **57**, 15-16 et PV, 1990, **58**, 10-12). La masse de référence ainsi définie est utilisée pour étalonner les étalons nationaux en platine iridié (*Metrologia*, 1994, **31**, 317-336).

Dans le cas d'étalons en acier inoxydable, l'incertitude relative de la comparaison des étalons du kilogramme est limitée à  $1 \times 10^{-8}$ , en raison de l'incertitude relative de la correction due à la poussée de l'air. Les résultats des comparaisons dans le vide doivent être soumis à d'autres corrections pour tenir compte des changements de masse des étalons lors du passage du vide à la pression atmosphérique.

L'étalonnage d'une série de masses est une opération simple qui permet de passer aux multiples et sous-multiples du kilogramme.

## 3 Temps

### 3.1 Unité de temps

Un petit nombre de laboratoires nationaux de métrologie du temps réalisent l'unité de temps avec une exactitude ultime. Pour cela, ils conçoivent et construisent des étalons primaires de fréquence qui produisent des oscillations électriques dont la fréquence est dans un rapport connu avec la fréquence de transition de l'atome de césium 133 qui définit la seconde. En 1997, les meilleurs de ces étalons primaires délivrent la seconde du SI avec une incertitude-type relative composée de  $2 \times 10^{-15}$ . Il est important de noter que la définition de la seconde doit être comprise comme la définition de l'unité de temps propre : elle s'applique dans un petit domaine spatial qui accompagne l'atome de césium dans son mouvement. Dans un laboratoire assez petit pour que la non-uniformité du potentiel gravitationnel ait des effets négligeables par rapport à l'incertitude de la réalisation de la seconde, la seconde propre s'obtient en apportant une correction pour la vitesse de l'atome dans le laboratoire d'après la théorie de la relativité restreinte. Il n'y a pas lieu de faire une correction pour le champ gravitationnel ambiant.

Les étalons primaires de fréquence permettent aussi d'étalonner la fréquence des étalons de temps secondaires utilisés dans les centres horaires nationaux. Ceux-ci sont généralement des horloges commerciales à césium qui se distinguent par leur stabilité à long terme : capables de conserver une fréquence avec une stabilité relative meilleure que  $10^{-14}$  sur des périodes de plusieurs mois, elles constituent d'excellents 'garde-temps'. Leur incertitude relative de fréquence est de l'ordre de  $10^{-12}$ . Les laboratoires de métrologie du temps disposent aussi de masers à hydrogène commerciaux, remarquables pour leur stabilité à court terme. Ces dispositifs sont indispensables à toutes les applications nécessitant une référence très stable pour des durées moyennes inférieures à un jour (stabi-

lité relative de  $1 \times 10^{-15}$  à 10 000 s). Dans leur configuration de base, les masers à hydrogène peuvent être affectés de dérive de fréquence observable par comparaison avec une horloge à césium dès que l'on détermine leur fréquence moyenne sur plusieurs jours. Cette dérive est très réduite s'ils fonctionnent en mode actif et avec une cavité auto-asservie. Horloges à césium et masers à hydrogène doivent être conservés dans des conditions d'environnement soigneusement régulées.

### 3.2 Comparaison d'horloges, échelles de temps

Les laboratoires nationaux possèdent généralement plusieurs horloges en fonctionnement au même moment et combinent leurs données afin de construire une échelle de temps pérenne. Cette échelle est aussi plus stable et plus exacte que la plupart des horloges qui y contribuent. Cette échelle est fondée sur les résultats des comparaisons d'horloges effectuées localement dans le laboratoire avec une incertitude souvent inférieure à 100 ps. Ces échelles de temps sont généralement désignées par  $TA(k)$  pour le laboratoire  $k$ .

La synchronisation des horloges fonctionnant dans des laboratoires distants est aussi une préoccupation importante de la métrologie du temps. Elle nécessite des méthodes de comparaison horaire exactes et pouvant être mises en œuvre partout sur la Terre et à n'importe quel moment. Le système satellitaire du Global Positioning System (GPS) fournit une solution satisfaisante à ce problème : constitué de 24 satellites à défilement, ce système, conçu pour le positionnement, a la particularité que des horloges à césium sont embarquées et diffusent des signaux horaires qui sont utilisés de la manière suivante. Des mesures de comparaison entre les horloges locales de deux laboratoires distants et l'horloge d'un satellite visible depuis les deux laboratoires, sont effectuées puis différenciées. L'incertitude obtenue peut être de quelques nanosecondes pour une mesure de comparaison entre deux horloges sur une durée d'une dizaine de minutes, même si elles sont distantes de plusieurs milliers de kilomètres. Pour atteindre cette exactitude ultime, il convient de traiter les données brutes avec beaucoup de précautions, telles que la réjection systématique des mesures qui ne correspondent pas à des observations en vues simultanées strictes et l'application d'une correction pour la position exacte du satellite, qui n'est connue qu'avec quelques jours de retard.

Le GPS est utilisé de manière régulière pour lier les laboratoires nationaux d'un grand nombre de pays et il sera très prochainement complété par un système russe très semblable : le Global Navigation Satellite System (GLONASS). On met, d'autre part, au point des techniques dites « d'aller et retour » qui sont fondées sur l'émission d'un signal, optique ou de radio-fréquence, d'un laboratoire de temps vers un autre, et réciproquement, avec relais sur un satellite. L'ensemble de ces méthodes devrait permettre d'accéder à une exactitude sub-nanoseconde avant la fin du siècle. Il est important de signaler que dans tous les cas, les effets relativistes peuvent engendrer des corrections supérieures à 100 ns, dont il est indispensable de tenir compte.

La combinaison optimale de l'ensemble des données de comparaisons d'horloges maintenues dans les laboratoires de métrologie du temps permet d'établir une échelle de temps de référence mondiale, le Temps atomique international (TAI), échelle qui a été approuvée par la 14<sup>e</sup> CGPM en 1971 (Résolution 1 ; CR, 77 et *Metrologia*, 1972, **8**, 35). La première définition du TAI est celle proposée au Comité international par le CCDS en 1970 (Recommandation S 2 ; PV, **38**, 110 et *Metrologia*, 1971, **7**, 43) :

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.

Dans le cadre de la relativité générale, le TAI doit être vu comme une coordonnée temporelle (ou *temps-coordonnée*) dont la définition 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.

Pour de plus amples détails voir Proc. 21st General Assembly of the IAU, Buenos Aires, *IAU Trans.*, 1991, Vol. **XXIB** (Kluwer).

Le Comité international a accepté, le 1<sup>er</sup> janvier 1988, la responsabilité de l'établissement du TAI auparavant dévolue au Bureau international de l'heure. Le TAI est obtenu en deux étapes. On calcule d'abord une moyenne pondérée de quelque 200 horloges maintenues dans des conditions métrologiques dans une cinquantaine de laboratoires. L'algorithme utilisé est optimisé pour la stabilité à long terme, ce qui nécessite d'observer le comportement des horloges sur des durées suffisamment longues. L'une des conséquences est que le TAI n'est accessible qu'en temps différé, avec quelques semaines de retard. En 1997, la stabilité relative de fréquence du TAI est estimée à  $2 \times 10^{-15}$  pour des durées moyennes de deux mois. L'exactitude de la fréquence du TAI est appréciée en comparant son unité d'échelle aux diverses réalisations de la seconde du SI produites par les étalons primaires de fréquence. Ceci nécessite l'application d'une correction pour compenser le décalage relativiste de fréquence entre le lieu de fonctionnement de l'étalon primaire et un point fixe du géoïde en rotation. L'amplitude relative de cette correction est, entre des points fixes sur la surface de la Terre, de l'ordre de  $10^{-16}$  par mètre d'altitude. En 1997, l'écart entre l'unité d'échelle du TAI et la seconde du SI sur le géoïde en rotation est de  $+2,0 \times 10^{-14}$  s et est connu avec une incertitude de  $5 \times 10^{-15}$  s. On diminue cet écart en pilotant la fréquence du TAI

par application de corrections d'amplitude relative égale à  $1 \times 10^{-15}$ , tous les deux mois. Ce procédé ne dégrade pas la stabilité de TAI à moyen terme tout en améliorant son exactitude.

### 3.3 Les temps légaux

Le TAI n'est pas diffusé de façon directe dans la vie courante. Les temps légaux (diffusés par radio, télévision, horloge parlante etc.) sont donnés dans une échelle de temps appelée Temps universel coordonné (UTC) comme l'a recommandé la 15<sup>e</sup> CGPM dans sa Résolution 5 en 1975 (CR, 104 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180). L'UTC est défini de telle façon qu'il diffère du TAI d'un nombre entier de secondes, la différence entre l'UTC et le TAI est égale à  $-31$  s le 1<sup>er</sup> juillet 1997. Cette différence peut être modifiée de 1 s par l'emploi d'une seconde intercalaire, positive ou négative, afin que l'UTC reste en accord avec le temps défini par la rotation de la Terre, le soleil croisant le méridien de Greenwich au midi de l'UTC, à mieux que 0,9 s près en moyenne sur une durée de un an. De plus, les temps légaux de la plupart des pays sont décalés d'un nombre entier d'heures (fuseaux horaires et heure dite d'été) par rapport à l'UTC. Les laboratoires nationaux maintiennent une approximation de l'UTC désignée par UTC(*k*) pour le laboratoire *k*. Les écarts entre UTC(*k*) et UTC sont en général réduits à quelques centaines de nanosecondes.

## 4 Grandeurs électriques

La réalisation de l'ampère (unité de base du SI), de l'ohm ou du volt (unités dérivées du SI), directement selon leur définition et avec une exactitude élevée, demande un travail long et difficile. Les meilleures réalisations de l'ampère que l'on obtienne aujourd'hui font appel à des réalisations du watt, de l'ohm ou du volt. Le watt tel qu'il est réalisé de façon électrique est comparé à l'aide d'une balance à fléau avec le watt tel qu'il est réalisé de façon mécanique. L'expérience utilise une bobine dans un champ d'induction magnétique de telle façon qu'il n'est nécessaire de connaître ni les dimensions de la bobine ni la valeur de l'induction magnétique. L'ohm est réalisé en utilisant la variation de capacité d'un condensateur de Thompson-Lampard, variation qui est uniquement fonction du déplacement linéaire d'une électrode de garde. Le volt est réalisé au moyen d'une balance dans laquelle une force électrostatique est mesurée en fonction d'une force mécanique. On peut déduire l'ampère en combinant deux des trois unités précédentes. L'incertitude relative sur la valeur de l'ampère ainsi obtenu est estimée à quelques  $10^{-7}$ . L'ampère, l'ohm et le volt peuvent aussi être déterminés à partir des mesures de diverses combinaisons de constantes physiques. Les laboratoires utilisent aujourd'hui des étalons de référence du volt ou de l'ohm fondés respectivement sur l'effet Josephson ou l'effet Hall quantique, étalons qui sont nettement plus reproductibles et plus stables que quelques  $10^{-7}$ . C'est pour profiter de l'avantage qu'offrent ces méthodes très stables pour conserver les étalons de référence des laboratoires représentant les unités électriques, tout en prenant soin en même temps de ne pas modifier les définitions du SI, que la 18<sup>e</sup> Conférence générale a adopté, en 1987, la Résolution 6 suivante qui demande

de fonder les représentations du volt et de l'ohm sur des valeurs admises par convention de la constante de Josephson  $K_J$  et de la constante de von Klitzing  $R_K$ .

■ **18<sup>e</sup> CGPM, 1987, Résolution 6** (CR, 100 et *Metrologia*, 1988, 25, 115) : **ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm**

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.

En 1988, le Comité international a adopté les Recommandations 1 (CI-1988) et 2 (CI-1988) qui fixent par convention des valeurs précises pour les constantes de Josephson et de von Klitzing, et demandent aux laboratoires de fonder leurs étalons sur ces valeurs à dater du 1<sup>er</sup> janvier 1990.

■ **CIPM, 1988, Recommandation 1** (PV, 56, 19 et *Metrologia*, 1989, 26, 69) : **représentation du volt au moyen de l'effet Josephson**

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.

■ **CIPM, 1988, Recommandation 2 (PV, 56, 20 et *Metrologia*, 1989, 26, 70) : représentation de l'ohm au moyen de l'effet Hall quantique**

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,

**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.

Lors de la session de 1988 le CCE a soigneusement considéré la façon dont les valeurs recommandées  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$ , admises par convention, doivent être utilisées. Pour clarifier les conséquences de ces recommandations, il a fait des déclarations complémentaires que l'on peut résumer comme suit :

1. Les Recommandations 1 (CI-1988) et 2 (CI-1988) ne constituent pas une redéfinition des unités SI. Les valeurs de  $K_{J-90}$  et  $R_{K-90}$ , admises par convention, ne peuvent être utilisées pour la définition du volt et de l'ohm, c'est-à-dire des unités de force électromotrice et de résistance électrique du Système international d'unités. Sinon la constante  $\mu_0$  n'aurait plus une valeur définie exactement, ce qui rendrait caduque la définition de l'ampère, et les unités électriques seraient incompatibles avec la définition du kilogramme et des unités qui en dérivent.
2. Au sujet de l'utilisation d'indices associés aux symboles des grandeurs ou unités, le CCE considère que les symboles des grandeurs force électromotrice (potentiel électrique, différence de potentiel électrique) ou résistance électrique, ainsi que ceux du volt ou de l'ohm, ne devraient pas être modifiés par l'adjonction d'indices désignant des laboratoires ou des dates particuliers.

Ces déclarations ont été ultérieurement approuvées par le Comité international. La 19<sup>e</sup> Conférence générale (1991, Résolution 2) a recommandé de poursuivre les recherches concernant la théorie fondamentale de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique.

## 5 Température

On ne peut faire des mesures directes de la température thermodynamique qu'en utilisant l'un des rares thermomètres appelés primaires. Ce sont des thermomètres dont l'équation d'état peut être écrite de façon explicite sans avoir à introduire des constantes inconnues qui dépendent de la température. Plusieurs thermomètres primaires ont été utilisés pour obtenir des valeurs exactes de la température thermodynamique, parmi lesquels le thermomètre à gaz à volume constant, le thermomètre acoustique à gaz, les thermomètres à rayonnement spectral ou total et le thermomètre électronique à bruit. Avec ces thermomètres on a obtenu des incertitudes de quelques millikelvins jusqu'à environ 373 K ;

au-delà, les incertitudes augmentent progressivement. Pour obtenir de ces thermomètres une grande exactitude, il faut entreprendre un travail long et difficile. Il existe par ailleurs des thermomètres secondaires, comme le thermomètre à résistance de platine, avec lesquels la reproductibilité des mesures peut être de l'ordre de dix fois supérieure à celle des mesures effectuées avec l'un quelconque des thermomètres primaires. Afin de tirer le meilleur parti de ces thermomètres secondaires, la Conférence générale a au cours du temps adopté des versions successives d'une échelle internationale de température. La première de ces échelles a été l'Échelle internationale de température de 1927 (EIT-27) ; elle a été remplacée par l'Échelle internationale pratique de température de 1948 (EIPT-48), qui, à son tour, a fait place à l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIPT-68). En 1976 le CIPM a adopté, pour les basses températures, l'Échelle provisoire de température de 0,5 K à 30 K de 1976 (EPT-76). Le 1<sup>er</sup> janvier 1990, l'EIPT-68 et l'EPT-76 ont été remplacées par l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) adoptée par le CIPM en 1989 par sa Recommandation 5 (CI-1989). La 19<sup>e</sup> Conférence générale (1991, Résolution 3) a recommandé aux laboratoires nationaux de poursuivre leurs efforts pour améliorer l'uniformité mondiale et la stabilité à long terme des mesures de température en mettant rapidement en œuvre l'EIT-90.

■ **CIPM, 1989, Recommandation 5 (PV, 57, 26 et *Metrologia*, 1990, 27, 13) : Échelle internationale de température de 1990**

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 (EIPT-68).

Le CIPM **souligne** que, par rapport à l'EIPT-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.

L'EIT-90 s'étend de 0,65 K jusqu'à la température la plus élevée mesurable à l'aide d'un pyromètre optique. L'échelle est fondée sur 1) une série de points fixes

de définition et 2) des méthodes d'interpolation à utiliser entre ces points. Les points fixes de définition sont les températures d'un certain nombre d'états thermodynamiques réalisables de façon expérimentale auxquelles on s'est mis d'accord pour assigner une valeur convenue. Les interpolations sont définies entre 0,65 K et 5 K au moyen d'équations de la pression de vapeur saturante de l'hélium, entre 3 K et 24,5561 K au moyen du thermomètre d'interpolation à gaz à volume constant, entre 13,8033 K et 961,78 °C au moyen du thermomètre à résistance de platine et aux températures supérieures à l'aide de la loi du rayonnement de Planck. Dans plusieurs domaines de température plusieurs définitions de la température  $T_{90}$  définie par l'échelle coexistent. Les différentes définitions sont équivalentes.

Des conseils pour réaliser et mettre en œuvre l'EIT-90 sont donnés dans deux documents, *Supplementary Information for the ITS-90* et *Techniques simplifiées permettant d'approcher l'Échelle internationale de température de 1990*, documents qui sont approuvés et mis à jour périodiquement par le Comité consultatif de thermométrie et publiés par le BIPM.

## 6 Quantité de matière

Tous les résultats quantitatifs d'analyses chimiques ou de dosages peuvent être exprimés en unités de quantité de matière des entités élémentaires dont l'unité de base est la mole. Le principe des mesures physiques fondées sur cette unité est exposé ci-après.

Le cas le plus simple est celui d'un échantillon d'un corps pur que l'on considère comme formé d'atomes ; appelons X le symbole chimique de ces atomes. Une mole d'atomes X contient par définition autant d'atomes qu'il y a d'atomes  $^{12}\text{C}$  dans 0,012 kg de carbone 12. Parce qu'on ne sait pas mesurer avec exactitude la masse  $m(^{12}\text{C})$  d'un atome de carbone 12, ni la masse  $m(\text{X})$  d'un atome X, on utilise le rapport de ces masses  $m(\text{X})/m(^{12}\text{C})$  qui peut être déterminé avec exactitude, par exemple au moyen d'un piège de Penning. La masse correspondant à 1 mol de X est alors  $[m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0,012$  kg, ce que l'on exprime en disant que la masse molaire  $M(\text{X})$  de X (quotient de la masse par la quantité de matière) est :

$$M(\text{X}) = [m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0,012 \text{ kg/mol.}$$

Par exemple, l'atome de fluor  $^{19}\text{F}$  et l'atome de carbone  $^{12}\text{C}$  ont des masses qui sont dans un rapport de 18,9984/12 environ. La masse molaire du gaz moléculaire  $\text{F}_2$  est :

$$M(\text{F}_2) = \frac{2 \times 18,9984}{12} \times 0,012 \text{ kg/mol} = 0,037\,996\,8 \text{ kg/mol,}$$

et la quantité de matière correspondant à une masse donnée, 0,0500 kg par exemple, d'un gaz  $\text{F}_2$ , est :

$$\frac{0,0500 \text{ kg}}{0,037\,996\,8 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = 1,316 \text{ mol.}$$

Dans le cas d'un corps pur que l'on considère comme formé de molécules B, qui sont des combinaisons d'atomes X, Y, ... selon la formule chimique  $B = X_\alpha Y_\beta \dots$ , la masse d'une molécule est  $m(B) = \alpha m(X) + \beta m(Y) + \dots$ . Cette masse n'est pas connue précisément, mais le rapport  $m(B)/m(^{12}\text{C})$  peut être déterminé avec exactitude. La masse molaire du corps moléculaire B est alors :

$$M(B) = \frac{m(B)}{m(^{12}\text{C})} \times 0,012 \text{ kg/mol} = \left( \alpha \frac{m(X)}{m(^{12}\text{C})} + \beta \frac{m(Y)}{m(^{12}\text{C})} + \dots \right) \times 0,012 \text{ kg/mol}.$$

On procède de la même façon dans le cas le plus général où la substance considérée B a la composition spécifiée  $B = X_\alpha Y_\beta \dots$  même si  $\alpha$  et  $\beta$  ne sont pas des nombres entiers. Autrement dit, si l'on désigne par  $r(X)$ ,  $r(Y)$ , ... les rapports de masse  $m(X)/m(^{12}\text{C})$ ,  $m(Y)/m(^{12}\text{C})$ , ... la masse molaire de la substance moléculaire B est donnée par la formule générale :

$$M(B) = [\alpha r(X) + \beta r(Y) + \dots] \times 0,012 \text{ kg/mol}.$$

D'autres méthodes pour mesurer les quantités de matière sont fondées sur les lois de la physique et de la physicochimie. En voici trois exemples :

1. Dans le cas des gaz parfaits, 1 mol de particules d'un gaz quelconque occupe le même volume à une température  $T$  et à une pression  $p$  (environ  $0,0224 \text{ m}^3$  à  $T = 273,15 \text{ K}$  et  $p = 101\,325 \text{ Pa}$ ) ; d'où une méthode pour mesurer le rapport des quantités de matière pour deux gaz quelconques (on sait déterminer les corrections nécessaires si les gaz ne sont pas parfaits).
2. Dans le cas des réactions électrolytiques quantitatives, on peut mesurer le rapport des quantités de matière par des mesures de quantité d'électricité. Par exemple, 1 mol de Ag et (1/2) mol de Cu sont déposées sur une cathode par la même quantité d'électricité (environ  $96\,485 \text{ C}$ ).
3. L'application des lois de Raoult pour les solutions très diluées est aussi une méthode de mesure des rapports des quantités de matière.

## 7 Grandeurs photométriques

La définition de la candela mentionnée page 21 est exprimée en termes strictement physiques. L'objectif de la photométrie, toutefois, est de mesurer la lumière d'une manière telle que le résultat de la mesure exprime de façon précise la sensation visuelle d'un observateur humain. À cet effet, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) a introduit deux fonctions spéciales  $V(\lambda)$  et  $V'(\lambda)$ , ou fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale, qui décrivent, respectivement, la sensibilité relative spectrale de l'œil humain moyen en vision photopique (adaptée à la lumière) ou scotopique (adaptée à l'obscurité). La plus importante des deux, la fonction  $V(\lambda)$ , pour la vision adaptée à la lumière, est rapportée à sa valeur pour le rayonnement monochromatique auquel la rétine est la plus sensible pour un haut niveau d'éclairement, c'est-à-dire au rayonnement à  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  qui correspond à une longueur d'onde de  $555,016 \text{ nm}$  dans l'air normal.

Le Comité international a approuvé l'emploi de ces fonctions, ce qui a pour conséquence que les grandeurs photométriques correspondantes sont définies en

Principes régissant  
la photométrie,  
*Monographie*  
BIPM, 1983,31 p.

termes strictement physiques comme des grandeurs proportionnelles à l'intégrale d'une répartition spectrale de puissance, pondérée selon une fonction spécifiée de la longueur d'onde.

La candela est une des unités de base du SI depuis les débuts : elle est restée unité de base même après qu'elle eut été liée, en 1979, à l'unité dérivée de puissance, le watt. Les premiers étalons photométriques étaient des sources lumineuses, les plus anciens étant des bougies, d'où le nom de candela pour l'unité photométrique de base. De 1948 à 1979 le rayonnement d'un corps noir, ou rayonnement du radiateur de Planck, à la température de congélation du platine, était utilisé pour définir la candela. Aujourd'hui, l'unité est définie par référence à un rayonnement monochromatique plutôt que par référence à un rayonnement à large bande, comme c'est le cas pour le corps noir. La valeur 1/683 watt par stéradian qui figure dans la définition actuelle a été choisie en 1979 pour réduire le plus possible les changements des réalisations moyennes des unités photométriques conservées dans les laboratoires nationaux.

La définition ne donne aucune indication de la manière dont la candela doit être réalisée, ce qui présente le grand avantage de permettre de faire appel à de nouvelles techniques pour réaliser la candela sans avoir à changer la définition de l'unité de base. Aujourd'hui, les laboratoires nationaux de métrologie réalisent la candela au moyen de méthodes radiométriques. Cependant, les lampes étalons sont toujours utilisées pour conserver les unités photométriques : elles fournissent soit une intensité lumineuse connue, dans une certaine direction, soit un flux lumineux connu.

# Index

## A

accélération due à la pesanteur ( $g_n$ ), **42**  
 ampère, **19**, 46  
 are, 30  
 atmosphère normale, **47**

## B

becquerel, 23, 51  
 bougie nouvelle, **49**, 55  
 Bureau international des poids et mesures (BIPM), 5

## C

candela, **21**, 49-50  
 Comité international des poids et mesures (CIPM), 5  
 Comités consultatifs, 6-7  
 Conférence générale des poids et mesures (CGPM), 5  
 Convention du Mètre, 5  
 coulomb, **46**  
 courant électrique (*voir* à ampère)  
 curie, 32, 50

## D

décimètre cube, 56  
 définition des unités, mise en pratique des, 58-76  
 degré Celsius, 19, 47-48  
 dose absorbée (*voir* à gray)  
 dose, équivalent de (*voir* à sievert)

## E

échelle thermodynamique à un seul point fixe (point triple de l'eau), 46-47  
 effet Hall quantique, 70-72  
 effet Josephson, 70-71  
 électronvolt, 29

## F

farad, 38, **46**  
 force, 19, 23  
 fréquence, étalon de, 43, 66

## G

$g_n$ , **42**  
 grandeurs  
   électriques, 69-72  
   logarithmiques (neper, bel), 28  
   photométriques, 75-76  
   sans dimension, 25  
   système de, 15  
 gray, 23, 25, 51

## H

hectare, 30  
 henry, 23, 38, **46**, 55  
 hertz, 23, 25, 38, 55  
 heure, 28

## I

intensité lumineuse, 20-21, 49

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

**J**

jansky, 32  
joule, 23, 38, **46**, 47  
jour, 28

**K**

kelvin, **19**, 48  
kilogramme, **18**, 26, 39, 42, 65 ;  
multiples, 26, 42

**L**

législation sur les unités, 16  
litre, 28, 56-57 ; symboles, 56-57  
longueur, 17, 39-41, 58-65  
lumen, 23, 38, 55 ; nouveau, 49  
lux, 23, 38, 55

**M**

masse, 18, 42, 65  
masse et poids, 42  
mètre, **17**, 39-41, 58-65  
Metrologia, 7  
micron, 32, 55  
minute, 28  
mise en pratique des définitions  
des principales unités, 58-76  
mole, **20**, 48-49, 74-75  
multiples du kilogramme, 26, 42

**N**

newton, 19, 23, 38, 46  
nombre, écriture des, 54

**O**

ohm, 23, 38, **46**, 70-72

**P**

pascal, 23, 46  
poids (*voir* à masse)  
point triple de l'eau, 19, 46-47  
préfixes SI, 15, 26, 37, 53-54 ;  
règles d'emploi, 34

**Q**

quantité de matière, 20, 48-49, 74-75  
quantité de chaleur (*voir* à joule)

**R**

radian, 23, 37, 52-53

**S**

seconde, **18**, 42-44  
siemens, 46  
sievert, 23, 25, 51-52  
stéradian, 23, 37, 52-53  
symboles  
écriture et emploi des, 33-34  
litre, 28, 56-57  
unités de base, 21  
unités dérivées ayant des noms  
spéciaux, 23  
système  
cohérent d'unités, 13, 27, 38  
de grandeurs, 15  
international d'unités (SI),  
36-39  
pratique d'unités de mesure,  
proposition d'établissement  
d'un, 35-36

**T**

TAI, 44-45, 68-69  
température, 46-48, 72-74  
Celsius, 19, 47  
thermodynamique, 19, 46-48  
temps, 18, 42-45, 66-69  
atomique international (TAI),  
44-45, 68-69  
universel coordonné (UTC),  
45, 69  
tesla, 23, 38  
tonne, 28, 55

**U**

## unités

- CGS ayant des noms spéciaux,  
31
- électriques, 45-46
- en usage avec le SI, 27-30
- de force, 45
- généralement déconseillées, 32
- législation sur les, 16
- maintenues temporairement, 30
- photométriques, 49
- de masse atomique unifiée, 29
- de quantité de chaleur  
(voir à joule)

## unités SI,

- les 2 classes, 14
- de base, 17-21, 39-50 ;  
symboles, 21
- dérivées, 21-25, 50-52
- ayant des noms spéciaux, 23
- multiples et sous-multiples  
des, 15, 26, 53-54
- supplémentaires, 52-53

UTC, 45, 69

**V**

## vitesse de la lumière

(valeur recommandée), 40

volt, 23, 38, **46**, 55, 70-71**W**watt, 23, 38, **46**, 55weber, 23, 38, **46**



---

**Bureau International  
des Poids et Mesures**

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

**7th edition 1998**

---

**Organisation Intergouvernementale  
de la Convention du Mètre**

#### Note on the use of the English text

To make its work more widely accessible, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of its reports. Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

Translations, complete or partial, of this brochure (or of its earlier editions) have been published in various languages, notably in Bulgarian, Chinese, Czech, English, German, Japanese, Korean, Portuguese, Romanian and Spanish. The ISO and numerous countries have also published standards and guides to the use of SI units.

## The BIPM and the Convention du Mètre

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

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

The task of the BIPM is to ensure world-wide unification of physical measurements; its function is thus to:

- establish fundamental standards and scales for the measurement of the principal physical quantities and maintain the international prototypes;
- carry out comparisons of national and international standards;
- ensure the coordination of corresponding measuring techniques;
- carry out and coordinate measurements of the fundamental physical constants relevant to these activities.

The BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) and reports to it on the work accomplished by the BIPM.

Delegates from all Member States of the Convention du Mètre attend the Conférence Générale which, at present, meets every four years. The function of these meetings is to :

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

The Comité International has eighteen members each from a different State: at present, it meets every year. The officers of this committee present an Annual

As of 31 December 1997, forty-eight States were members of this Convention: Argentina, Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China, Czech Republic, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, Germany, Hungary, India, Indonesia, Iran (Islamic Rep. of), Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep. of), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, New Zealand, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Russian Federation, Singapore, Slovakia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, United Kingdom, United States, Uruguay, Venezuela.

Report on the administrative and financial position of the BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre. The principal task of the CIPM is to ensure world-wide uniformity in units of measurement. It does this by direct action or by submitting proposals to the CGPM.

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

Some forty-five physicists and technicians work in the BIPM laboratories. They mainly carry out metrological research, international comparisons of realizations of units and calibrations of standards. An annual report, published in the *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures*, gives details of the work in progress.

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

The *Comités Consultatifs* have common regulations (PV, 1963, **31**, 97). They meet at irregular intervals. The chairman of each *Comité Consultatif* is designated by the CIPM and is normally a member of the CIPM. The members of the *Comités Consultatifs* are metrology laboratories and specialized institutes, agreed by the CIPM, which send delegates of their choice (Criteria for membership of *Comités Consultatifs*, PV, 1996, **64**, 124). In addition, there are individual members appointed by the CIPM, and a representative of the BIPM. At present, there are nine such committees:

1. The *Comité Consultatif d'Électricité et Magnétisme* (CCEM), new name given in 1997 to the *Comité Consultatif d'Électricité* set up in 1927;
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP) set up in 1933 (between 1930 and 1933 the CCE dealt with matters concerning photometry);
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), set up in 1937;
4. The *Comité Consultatif des Longueurs* (CCL), new name given in 1997 to the *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), set up in 1952;
5. The *Comité Consultatif du Temps et des Fréquences* (CCTF), new name given in 1997 to the *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS) set up in 1956;

6. The Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants (CCRI), new name given in 1997 to the Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI) set up in 1958 (in 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of x and  $\gamma$  rays, electrons), Section II (Measurement of radionuclides), Section III (Neutron measurements), Section IV ( $\alpha$ -energy standards); in 1975 this last section was dissolved and Section II was made responsible for its field of activity);
7. The Comité Consultatif des Unités (CCU), set up in 1964 (this committee replaced the “Commission for the System of Units” set up by the CIPM in 1954);
8. The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), set up in 1980;
9. The Comité Consultatif pour la Quantité de Matière (CCQM), set up in 1993.

The proceedings of the Conférence Générale, the Comité International and the Comités Consultatifs are published by the BIPM in the following series:

- *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CR)*;
- *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures (PV)*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*.

The Bureau International also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title *Le Système International d'Unités (SI)*, this brochure, periodically updated, in which are collected all the decisions and recommendations concerning units.

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

The scientific work of the BIPM is published in the open scientific literature and an annual list of publications appears in the *Procès-Verbaux* of the CIPM.

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

# The International System of Units      Contents

<b>The BIPM and the Convention du Mètre</b>	<b>83</b>
<b>Preface to the 7th edition</b>	<b>88</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>90</b>
1.1 Historical note	90
1.2 Two classes of SI units	92
1.3 The SI prefixes	92
1.4 System of quantities	93
1.5 SI units in the framework of general relativity	93
1.6 Legislation on units	93
<b>2 SI units</b>	<b>94</b>
2.1 SI base units	94
2.1.1 Definitions	94
2.1.1.1 Unit of length (metre)	94
2.1.1.2 Unit of mass (kilogram)	95
2.1.1.3 Unit of time (second)	95
2.1.1.4 Unit of electric current (ampere)	95
2.1.1.5 Unit of thermodynamic temperature (kelvin)	96
2.1.1.6 Unit of amount of substance (mole)	97
2.1.1.7 Unit of luminous intensity (candela)	97
2.1.2 Symbols for base units	98
2.2 SI derived units	98
2.2.1 Units expressed in terms of base units	98
2.2.2 Units with special names and symbols; units which incorporate units with special names and symbols	99
2.2.3 Units for dimensionless quantities, quantities of dimension one	102
<b>3 Decimal multiples and submultiples of SI units</b>	<b>103</b>
3.1 SI prefixes	103
3.2 The kilogram	103
<b>4 Units outside the SI</b>	<b>104</b>
4.1 Units used with the SI	104
4.2 Other non-SI units	107

<b>5</b>	<b>The writing of SI unit names and symbols</b>	<b>109</b>
5.1	General principles	109
5.2	SI unit symbols	109
5.3	Algebra of SI unit symbols	109
5.4	Rules for using SI prefixes	110
	<b>Appendix 1. Decisions of the CGPM and the CIPM</b>	<b>111</b>
1	Decisions relating to the establishment of the <i>Système International d'Unités, SI</i>	111
1.1	Practical system of units: establishment of the SI	111
1.2	The SI	112
2	Decisions relating to base units of the <i>Système International</i>	115
2.1	Length	115
2.2	Mass	118
2.3	Time	118
2.4	Electric current	121
2.5	Thermodynamic temperature	122
2.6	Amount of substance	124
2.7	Luminous intensity	124
3	Decisions relating to SI derived and supplementary units	126
3.1	SI derived units	126
3.2	SI supplementary units	127
4	Decisions concerning terminology and the acceptance of units for use with the SI	129
4.1	SI prefixes	129
4.2	Unit symbols and numbers	129
4.3	Unit names	130
4.4	Units accepted for use with the SI; an example: the litre	131
	<b>Appendix 2. Practical realization of the definitions of some important units</b>	<b>133</b>
1	Length	133
2	Mass	140
3	Time	141
3.1	Unit of time	141
3.2	Clock comparisons, time scales	141
3.3	Legal time	143
4	Electrical quantities	143
5	Temperature	146
6	Amount of substance	148
7	Photometric quantities	149
	<b>Index</b>	<b>151</b>

## Preface to the 7th edition

Since 1970, the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) has now published seven editions of this document. It lists all Resolutions and Recommendations of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) and the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) relating to the International System of Units. Formal reference to CIPM and CGPM decisions are to be found in successive volumes of the *Comptes Rendus* of the CGPM (CR) and *Procès-Verbaux* of the CIPM (PV), the most recent are also listed in *Metrologia*. To simplify practical use of the SI, the text provides explanations of these decisions and accompanies them with relevant extracts from the international standards of the International Organization for Standardization (ISO).

The Comité Consultatif des Unités (CCU) of the CIPM helped to draft the document and approved the final text. This 7th edition is a revision of the 6th edition (1991); it takes into consideration decisions made by the CGPM and the CIPM since 1991. It also incorporates amendments made by the CCU.

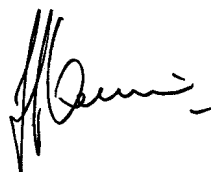
Appendix 1 reproduces the decisions (Resolutions, Recommendations, Declarations) promulgated since 1889 by the CGPM and the CIPM on units of measurement and the International System of Units.

Appendix 2 outlines the measurements, consistent with the theoretical definitions given in the principal text, which metrological laboratories can make to realize physical units and to calibrate material standards of the highest quality. In this edition, for the first time, the definition and hence the practical realizations of both the metre and the second are considered in the context of general relativity. Except where specified, uncertainties are quoted in the form of combined standard uncertainties or as relative combined standard uncertainties.

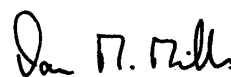


For more than twenty-five years this document has been used as a work of reference in many countries, organizations and scientific unions. To make its contents accessible to a greater number of readers, the CIPM decided, in 1985, to include an English version of the text in the 5th edition; this double presentation is continued in this 7th edition. For the first English version the BIPM endeavoured to produce a faithful translation of the French original by close collaboration with the National Physical Laboratory (Teddington, United Kingdom) and the National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, United States), at that time the National Bureau of Standards. For the present edition the French and English versions were prepared by the BIPM in close collaboration with the CCU. The CIPM decided in 1997 that in the English text the decimal marker would be the dot on the line, treating this as a translation of the comma, the French decimal marker. This has no implication for the translation of the decimal marker into other languages. A point to note is that slight spelling variations occur in the language of the English-speaking countries (for instance, “metre” and “meter”, “litre” and “liter”). In this respect, the English text presented here follows the International Standard ISO 31 (1992), *Quantities and units*. Readers should note that the official record is always that of the French text. This must be used when an authoritative reference is required or when there is doubt about the interpretation of the text.

November 1997



T. J. QUINN  
*Director, BIPM*



I. M. MILLS  
*President, CCU*

# 1 Introduction

## 1.1 Historical note

The 9th CGPM (1948, Resolution 6; CR, 64), instructed the CIPM:

- to study the establishment of a complete set of rules for units of measurement;
- to find out for this purpose, by official enquiry, the opinion prevailing in scientific, technical and educational circles in all countries;
- to make recommendations on the establishment of a *practical system of units of measurement* suitable for adoption by all signatories to the Convention du Mètre.

Decisions of the CGPM are recorded in the *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* and are here identified by the letters CR.

It also laid down, in Resolution 7 (CR, 70), general principles for the writing of unit symbols and listed units which have been assigned special names.

The 10th CGPM (1954, Resolution 6; CR, 80), and the 14th CGPM (1971, Resolution 3; CR, 78 and *Metrologia*, 1972, **8**, 36), adopted as base units of this practical system of units, the units of the following seven quantities: length, mass, time, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance and luminous intensity.

The 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR, 87), adopted the name *Système International d'Unités*, with the international abbreviation SI, for this practical system of units and laid down rules for prefixes, derived units and the former supplementary units, and other matters; it thus established a comprehensive specification for units of measurement. Since then successive meetings of the CGPM and CIPM have added to, and modified as necessary, the original structure of the SI to take account of advances in science and the needs of users.

The historical succession which led to these important CGPM decisions may be summarized as follows.

- The creation of the Decimal Metric System at the time of the French Revolution and the subsequent deposition of two platinum standards representing the metre and the kilogram, on 22 June 1799, in the Archives de la République in Paris can be seen as the first step in the development of the present International System of Units.
- In 1832, Gauss strongly promoted the application of this Metric System, together with the second defined in astronomy, as a coherent system of units for the physical sciences. Gauss was the first to make *absolute* measurements of the Earth's magnetic field in terms of a decimal system based on the *three*

*mechanical units* millimetre, gram and second for, respectively, the quantities length, mass and time. In later years Gauss and Weber extended these measurements to include electrical phenomena.

- These applications in the field of electricity and magnetism were further developed in the 1860s under the active leadership of Maxwell and Thomson through the British Association for the Advancement of Science (BAAS). They formulated the requirement for a *coherent system of units* with *base units* and *derived units*. In 1874 the BAAS introduced the *CGS system*, a three-dimensional coherent unit system based on the three mechanical units centimetre, gram and second, using prefixes ranging from micro to mega to express decimal submultiples and multiples. The following development of physics as an experimental science was largely based on this system.
- The sizes of the coherent CGS units in the fields of electricity and magnetism proved to be inconvenient so, in the 1880s, the BAAS and the International Electrical Congress, predecessor of the International Electrotechnical Commission (IEC), approved a mutually coherent set of *practical units*. Among them were the ohm forelectrical resistance, the volt for electromotive force, and the ampere for electric current.
- After the establishment of the Convention du Mètre on 20 May 1875 the CIPM concentrated on the construction of new prototypes taking the metre and kilogram as the base units of length and mass. In 1889 the 1st CGPM sanctioned the international prototypes for the metre and the kilogram. Together with the astronomical second as unit of time, these units constituted a three-dimensional mechanical unit system similar to the CGS system, but with the base units metre, kilogram and second, the MKS system.
- In 1901 Giorgi showed that it is possible to combine the mechanical units of this metre-kilogram-second system with the practical electric units to form a single coherent four-dimensional system by adding to the three base units a fourth unit of an electrical nature, such as the ampere or the ohm, and rewriting the equations occurring in electromagnetism in the so-called rationalized form. Giorgi's proposal opened the path to a number of new developments.
- After the revision of the Convention du Mètre by the 6th CGPM in 1921, which extended the scope and responsibilities of the BIPM to other fields in physics, and the subsequent creation of the CCE by the 7th CGPM in 1927, the Giorgi proposal was thoroughly discussed by the IEC, the IUPAP and other international organizations. This led the CCE to propose, in 1939, the adoption of a four-dimensional system based on the metre, kilogram, second and ampere, the MKSA system, a proposal approved by the CIPM in 1946.
- Following an international inquiry by the BIPM, which began in 1948, the 10th CGPM, in 1954, approved the introduction of the *ampere*, the *kelvin* and the *candela* as base units, respectively, for electric current, thermodynamic temperature and luminous intensity. The name *Système International d'Unités* (SI) was given to the system by the 11th CGPM in 1960. At the 14th CGPM in 1971 the current version of the SI was completed by adding the *mole* as the base unit for amount of substance, bringing the total number of base units to seven.

## 1.2 Two classes of SI units

SI units are divided into two classes:

- *base* units;
- *derived* units.

From the scientific point of view, the division of SI units into these two classes is to a certain extent arbitrary, because it is not essential to the physics of the subject. Nevertheless, the CGPM, considering the advantages of a single, practical, world-wide system of units for international relations, for teaching and for scientific work, decided to base the International System on a choice of seven well-defined units which by convention are regarded as dimensionally independent: the metre, the kilogram, the second, the ampere, the kelvin, the mole, and the candela (see 2.1, p. 94). These SI units are called *base units*.

The second class of SI units is that of *derived units*. These are units that are formed as products of powers of the base units according to the algebraic relations linking the quantities concerned. The names and symbols of some units thus formed in terms of base units may be replaced by special names and symbols which can themselves be used to form expressions and symbols for other derived units (see 2.2, p. 98).

The SI units of these two classes form a *coherent* set of units, where coherent is used in the specialist sense of a system whose units are mutually related by rules of multiplication and division with no numerical factor other than 1. Following CIPM Recommendation 1 (1969; PV, 37, 30-31 and *Metrologia*, 1970, 6, 66), the units of this coherent set of units are designated by the name *SI units*.

It is important to emphasize that each physical quantity has only one SI unit, even if this unit can be expressed in different forms. The inverse, however, is not true; in some cases the same SI unit can be used to express the values of several different quantities (see p. 101).

The radian and steradian, units of plane and solid angle, were admitted to the SI as a separate class of units, called supplementary units, by the 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR, 87). The 20th CGPM (1995, Resolution 8; CR, 223 and *Metrologia*, 1996, 33, 83) eliminated the supplementary units as a separate class within the SI and included the radian and steradian in the class of derived units.

Recommendations of the CIPM are recorded in the *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures* and are here identified by the letters PV.

## 1.3 The SI prefixes

The CGPM adopted a series of prefixes for use in forming the decimal multiples and submultiples of SI units (see 3.1 and 3.2, p. 103). Following CIPM Recommendation 1 (1969) mentioned above, these are designated by the name *SI prefixes*.

The SI units, that is to say the base and derived units of the SI, form a coherent set, *the set of SI units*. The multiples and submultiples of the SI units formed by using the SI units combined with SI prefixes are designated by their complete name, *decimal multiples and submultiples of SI units*. These decimal multiples and submultiples of SI units are not coherent with the SI units themselves.

As an exception, the multiples and submultiples of the kilogram are formed by attaching prefix names to the unit name “gram”, and prefix symbols to the unit symbol “g”.

## 1.4 System of quantities

The system of quantities used with the SI units is dealt with by Technical Committee 12 of the International Organization for Standardization (ISO/TC 12) and is not treated here. Since 1955, the ISO/TC 12 has published a series of International Standards on quantities and their units which strongly recommends the use of the International System of Units.

In these International Standards, the ISO has adopted a system of physical quantities based on the seven base quantities corresponding to the seven base units of the SI, namely: length, mass, time, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance, and luminous intensity. Other quantities, called derived quantities, are defined in terms of these seven base quantities; the relationships between derived quantities and base quantities are expressed by a system of equations. It is this system of quantities and equations that is properly used with the SI units.

For a detailed exposition of the system of quantities used with the SI units see ISO 31, *Quantities and Units* (ISO Standards Handbook, 3rd edition, ISO, Geneva, 1993).

## 1.5 SI units in the framework of general relativity

The definitions of the base units of the SI were agreed in a context which takes no account of relativistic effects. When such account is taken, it is clear that the definitions apply only in a small spatial domain which shares the motion of the standards that realize them. These units are therefore proper units; they are realized from local experiments in which the relativistic effects that need to be taken into account are those of special relativity. The constants of physics are local quantities with their values expressed in proper units.

Realizations of a unit using different standards are usually compared locally. For frequency standards, however, it is possible to make such comparisons at a distance by means of electromagnetic signals. To interpret the results, the theory of general relativity is required since it predicts, among other things, a frequency shift between standards of about 1 part in  $10^{16}$  per metre of altitude difference at the surface of the Earth. Effects of this magnitude can be comparable with the uncertainty of realization of the metre or the second based on a periodic signal of given frequency (*see* Appendix 2, p. 133).

The question of proper units is addressed in Resolution A4 adopted by the XX1st General Assembly of the International Astronomical Union (IAU) in 1991 and by the report of the CCDS working group on the application of general relativity to metrology (*Metrologia*, 1997, **34**, 261-290).

## 1.6 Legislation on units

By legislation, individual countries have established rules concerning the use of units on a national basis, either for general use or for specific areas such as commerce, health, public safety and education. In almost all countries this legislation is based on the use of the International System of Units.

The Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML), founded in 1955, is charged with the international harmonization of this legislation.

## 2 SI units

### 2.1 SI base units

Formal definitions of all SI base units are approved by the CGPM. The first such definition was approved in 1889 and the most recent in 1983. These definitions are modified from time to time as techniques of measurement evolve and allow more accurate realizations of the base units.

#### 2.1.1 Definitions

Current definitions of the base units, as taken from the *Comptes Rendus* (CR) of the corresponding CGPM, are here shown indented and in a heavy font. Related decisions which clarify these definitions but are not formally part of them, as taken from the *Comptes Rendus* (CR) of the corresponding CGPM or the *Procès-Verbaux* (PV) of the CIPM, are also shown indented in a font of normal weight. The linking text provides historical notes and explanations but is not part of the definitions themselves.

##### 2.1.1.1 Unit of length (metre)

The 1889 definition of the metre, based upon the international prototype of platinum-iridium, was replaced by the 11th CGPM (1960) using a definition based upon a wavelength of krypton 86 radiation. This definition was adopted in order to improve the accuracy with which the metre may be realized. In turn, this was replaced in 1983 by the 17th CGPM (Resolution 1; CR, 97 and *Metrologia*, 1984, **20**, 25):

**The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second.**

Note that the effect of this definition is to fix the speed of light at exactly  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The original international prototype of the metre, which was sanctioned by the 1st CGPM in 1889 (CR, 34-38), is still kept at the BIPM under conditions specified in 1889.

### 2.1.1.2 Unit of mass (kilogram)

The international prototype of the kilogram, made of platinum-iridium, is kept at the BIPM under conditions specified by the 1st CGPM in 1889 (CR, 34-38) when it sanctioned the prototype and declared:

This prototype shall henceforth be considered to be the unit of mass.

The 3rd CGPM (1901; CR, 70), in a declaration intended to end the ambiguity in popular usage concerning the word “weight” confirmed that:

**The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.**

The complete declaration appears on page 118.

### 2.1.1.3 Unit of time (second)

The unit of time, the second, was at one time considered to be the fraction  $1/86\,400$  of the mean solar day. The exact definition of “mean solar day” was based on astronomical theories. However, measurement showed that irregularities in the rotation of the Earth could not be taken into account by the theory and have the effect that this definition does not allow the required accuracy to be achieved. In order to define the unit of time more precisely, the 11th CGPM (1960; CR, 86) adopted a definition given by the International Astronomical Union which was based on the tropical year. Experimental work, however, had already shown that an atomic standard of time interval, based on a transition between two energy levels of an atom or a molecule, could be realized and reproduced much more precisely. Considering that a very precise definition of the unit of time is indispensable for the International System, the 13th CGPM (1967-1968, Resolution 1; CR, 103 and *Metrologia*, 1968, 4, 43) replaced the definition of the second by the following:

**The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom.**

At its 1997 meeting, the CIPM affirmed that:

This definition refers to a caesium atom in its ground state at a temperature of 0 K.

### 2.1.1.4 Unit of electric current (ampere)

Electric units, called “international”, for current and resistance were introduced by the International Electrical Congress held in Chicago in 1893, and definitions of the “international” ampere and the “international” ohm were confirmed by the International Conference of London in 1908.

Although it was already obvious on the occasion of the 8th CGPM (1933) that there was a unanimous desire to replace those “international” units by so-called “absolute” units, the official decision to abolish them was only taken by the 9th CGPM (1948), which adopted the ampere for the unit of electric current, following a definition proposed by the CIPM (1946, Resolution 2; PV, 20, 129-137):

**The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to  $2 \times 10^{-7}$  newton per metre of length.**

The expression “MKS unit of force” which occurs in the original text of 1946 has been replaced here by “newton”, a name adopted for this unit by the 9th CGPM (1948, Resolution 7; CR, 70). Note that the effect of this definition is to fix the permeability of vacuum at exactly  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ .

#### 2.1.1.5 Unit of thermodynamic temperature (kelvin)

The definition of the unit of thermodynamic temperature was given in substance by the 10th CGPM (1954, Resolution 3; CR, 79) which selected the triple point of water as the fundamental fixed point and assigned to it the temperature 273.16 K so defining the unit. The 13th CGPM (1967-1968, Resolution 3; CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43) adopted the name *kelvin* (symbol K) instead of “degree Kelvin” (symbol °K) and defined the unit of thermodynamic temperature as follows (Resolution 4; CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43):

**The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water.**

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

$$t = T - T_0.$$

The unit of Celsius temperature is the degree Celsius, symbol °C, which is by definition equal in magnitude to the kelvin. A difference or interval of temperature may be expressed in kelvins or in degrees Celsius (13th CGPM, 1967-1968, Resolution 3, mentioned above). The numerical value of a Celsius temperature  $t$  expressed in degrees Celsius is given by

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

The kelvin and the degree Celsius are also the units of the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the CIPM in 1989 in its Recommendation 5 (CI-1989) (PV, 57, 115 and *Metrologia*, 1990, 27, 13).



### 2.1.1.6 Unit of amount of substance (mole)

Following the discovery of the fundamental laws of chemistry, units called, for example, “gram-atom” and “gram-molecule”, were used to specify amounts of chemical elements or compounds. These units had a direct connection with “atomic weights” and “molecular weights”, which are in fact relative masses. “Atomic weights” were originally referred to the atomic weight of oxygen, by general agreement taken as 16. But whereas physicists separated isotopes in the mass spectrometer and attributed the value 16 to one of the isotopes of oxygen, chemists attributed that same value to the (slightly variable) mixture of isotopes 16, 17 and 18, which was for them the naturally occurring element oxygen. Finally, an agreement between the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) brought this duality to an end in 1959/60. Physicists and chemists have ever since agreed to assign the value 12, exactly, to the “atomic weight”, correctly the relative atomic mass, of the isotope of carbon with mass number 12 (carbon 12,  $^{12}\text{C}$ ). The unified scale thus obtained gives values of relative atomic mass.

It remained to define the unit of amount of substance by fixing the corresponding mass of carbon 12; by international agreement this mass was fixed at 0.012 kg, and the unit of the quantity “amount of substance” was given the name *mole* (symbol mol).

Following proposals by the IUPAP, the IUPAC and the ISO, the CIPM gave a definition of the mole in 1967 and confirmed it in 1969: this was adopted by the 14th CGPM (1971, Resolution 3; CR, 78 and *Metrologia*, 1972, **8**, 36):

1. **The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is “mol”.**
2. **When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.**

In 1980 the CIPM approved the report of the CCU (1980) which specified that

In this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to.

When the definition of the mole is quoted, it is conventional also to include this remark.

### 2.1.1.7 Unit of luminous intensity (candela)

The units of luminous intensity based on flame or incandescent filament standards in use in various countries before 1948 were replaced initially by the “new candle” based on the luminance of a Planckian radiator (a black body) at the temperature of freezing platinum. This modification had been prepared by the International Commission on Illumination (CIE) and by the CIPM before 1937 and the decision was promulgated by the CIPM in 1946. It was then ratified in 1948 by the 9th CGPM which adopted a new international name for this unit,

the *candela* (symbol cd); in 1967 the 13th CGPM (Resolution 5; CR, 104 and *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) gave an amended version of the 1946 definition.

In 1979, because of the experimental difficulties in realizing a Planck radiator at high temperatures and the new possibilities offered by radiometry, i.e. the measurement of optical radiation power, the 16th CGPM (1979, Resolution 3; CR, 100 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56) adopted a new definition of the candela:

**The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz and that has a radiant intensity in that direction of 1/683 watt per steradian.**

### 2.1.2 Symbols for base units

The base units of the International System are listed in Table 1 which relates the base quantity to the unit name and unit symbol (10th CGPM (1954, Resolution 6; CR, 80); 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR, 87); 13th CGPM (1967-1968, Resolution 3; CR, 104 and *Metrologia*, 1968, **4**, 43); 14th CGPM (1971, Resolution 3; CR, 78 and *Metrologia*, 1972, **8**, 36)).

**Table 1. SI base units**

Base quantity	SI base unit	
	Name	Symbol
length	metre	m
mass	kilogram	kg
time	second	s
electric current	ampere	A
thermodynamic temperature	kelvin	K
amount of substance	mole	mol
luminous intensity	candela	cd

## 2.2 SI derived units

Derived units are units which may be expressed in terms of base units by means of the mathematical symbols of multiplication and division. Certain derived units have been given special names and symbols, and these special names and symbols may themselves be used in combination with those for base and other derived units to express the units of other quantities.

### 2.2.1 Units expressed in terms of base units

Table 2 lists some examples of derived units expressed directly in terms of base units. The derived units are obtained by multiplication and division of base units.

**Table 2. Examples of SI derived units expressed in terms of base units**

Derived quantity	SI derived unit	
	Name	Symbol
area	square metre	m <sup>2</sup>
volume	cubic metre	m <sup>3</sup>
speed, velocity	metre per second	m/s
acceleration	metre per second squared	m/s <sup>2</sup>
wavenumber	reciprocal metre	m <sup>-1</sup>
density, mass density	kilogram per cubic metre	kg/m <sup>3</sup>
specific volume	cubic metre per kilogram	m <sup>3</sup> /kg
current density	ampere per square metre	A/m <sup>2</sup>
magnetic field strength	ampere per metre	A/m
concentration (of amount of substance)	mole per cubic metre	mol/m <sup>3</sup>
luminance	candela per square metre	cd/m <sup>2</sup>
refractive index	(the number) one	1 <sup>(a)</sup>

(a) The symbol “1” is generally omitted in combination with a numerical value.

### 2.2.2 Units with special names and symbols; units which incorporate units with special names and symbols

For convenience, certain derived units, which are listed in Table 3, have been given special names and symbols. These names and symbols may themselves be used to express other derived units: Table 4 shows some examples. The special names and symbols are a compact form for the expression of units which are used frequently.

Among these names and symbols, the last three entries in Table 3 are of particular note since they were accepted by the 15th CGPM (1975, Resolutions 8 and 9; CR, 105 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180) and the 16th CGPM (1979, Resolution 5; CR, 100 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56) specifically with a view to safeguarding human health.

In Tables 3 and 4, the final column shows how the SI units concerned may be expressed in terms of SI base units. In this column, factors such as m<sup>0</sup>, kg<sup>0</sup> ..., which are all equal to 1, are not shown explicitly.

Table 3. SI derived units with special names and symbols

Derived quantity	Name	Symbol	SI derived unit	
			Expressed in terms of other SI units	Expressed in terms of SI base units
plane angle	radian <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
solid angle	steradian <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
frequency	hertz	Hz		$s^{-1}$
force	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pressure, stress	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energy, work, quantity of heat	joule	J	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
power, radiant flux	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
electric charge, quantity of electricity	coulomb	C		$s \cdot A$
electric potential difference, electromotive force	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacitance	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
electric resistance	ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
electric conductance	siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
magnetic flux	weber	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetic flux density	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Celsius temperature	degree Celsius <sup>(d)</sup>	°C		K
luminous flux	lumen	lm	cd · sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
illuminance	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
activity (referred to a radionuclide)	becquerel	Bq		$s^{-1}$
absorbed dose, specific energy (imparted), kerma	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
dose equivalent, ambient dose equivalent, directional dose equivalent, personal dose equivalent, organ equivalent dose	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) The radian and steradian may be used with advantage in expressions for derived units to distinguish between quantities of different nature but the same dimension. Some examples of their use in forming derived units are given in Table 4.

(b) In practice, the symbols rad and sr are used where appropriate, but the derived unit “1” is generally omitted in combination with a numerical value.

(c) In photometry, the name steradian and the symbol sr are usually retained in expressions for units.

(d) This unit may be used in combination with SI prefixes, e.g. millidegree Celsius, m°C.

**Table 4. Examples of SI derived units whose names and symbols include SI derived units with special names and symbols**

Derived quantity	Name	SI derived unit	
		Symbol	Expressed in terms of SI base unit
dynamic viscosity	pascal second	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
moment of force	newton metre	N · m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
surface tension	newton per metre	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
angular velocity	radian per second	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
angular acceleration	radian per second squared	rad/s <sup>2</sup>	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
heat flux density, irradiance	watt per square metre	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
heat capacity, entropy	joule per kelvin	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
specific heat capacity, specific entropy	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
specific energy	joule per kilogram	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
energy density	joule per cubic metre	J/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
electric field strength	volt per metre	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
electric charge density	coulomb per cubic metre	C/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
electric flux density	coulomb per square metre	C/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
permittivity	farad per metre	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
permeability	henry per metre	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
molar energy	joule per mole	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
molar entropy, molar heat capacity	joule per mole kelvin	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
exposure (x and γ rays)	coulomb per kilogram	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
absorbed dose rate	gray per second	Gy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
radiant intensity	watt per steradian	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ $= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
radiance	watt per square metre steradian	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ $= \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

A single SI unit may correspond to several different quantities, as noted in paragraph 1.2 (p. 92). In the above table, which is not exhaustive, there are several examples. Thus the joule per kelvin (J/K) is the SI unit for the quantity heat capacity as well as for the quantity entropy; also the ampere (A) is the SI unit for the base quantity electric current as well as for the derived quantity magnetomotive force. It is therefore important not to use the unit alone to specify the quantity. This rule applies not only to scientific and technical texts but also, for example, to measuring instruments (i.e. an instrument should indicate both the unit and the quantity measured).

A derived unit can often be expressed in different ways by combining the names of base units with special names for derived units. This, however, is an algebraic freedom to be governed by common-sense physical considerations. Joule, for example, may formally be written newton metre, or even kilogram metre squared per second squared, but in a given situation some forms may be more helpful than others.

In practice, with certain quantities preference is given to the use of certain special unit names, or combinations of unit names, in order to facilitate the distinction between different quantities having the same dimension. For example, the SI unit of frequency is designated the hertz, rather than the reciprocal second, and the SI unit of angular velocity is designated the radian per second rather than the reciprocal second (in this case retaining the word radian emphasizes that angular velocity is equal to  $2\pi$  times the rotational frequency). Similarly the SI unit of moment of force is designated the newton metre rather than the joule.

In the field of ionizing radiation, the SI unit of activity is designated the becquerel rather than the reciprocal second, and the SI units of absorbed dose and dose equivalent the gray and sievert, respectively, rather than the joule per kilogram. The special names becquerel, gray and sievert were specifically introduced because of the dangers to human health which might arise from mistakes involving the units reciprocal second and the joule per kilogram.

The CIPM, recognizing the particular importance of the health-related units, agreed a detailed text on the sievert for the 5th edition of this brochure: see p. 127, Recommendation 1 (CI-1984) adopted by the CIPM (PV, 1984, 52, 31 and *Metrologia*, 1985, 21, 90).

### 2.2.3 Units for dimensionless quantities, quantities of dimension one

Certain quantities are defined as the ratios of two quantities of the same kind, and thus have a dimension which may be expressed by the number one. The unit of such quantities is necessarily a derived unit coherent with the other units of the SI and, since it is formed as the ratio of two identical SI units, the unit also may be expressed by the number one. Thus the SI unit of all quantities having the dimensional product one is the number one. Examples of such quantities are refractive index, relative permeability, and friction factor. Other quantities having the unit 1 include “characteristic numbers” like the Prandtl number  $\eta c_p/\lambda$  and numbers which represent a count, such as a number of molecules, degeneracy (number of energy levels) and partition function in statistical thermodynamics. All of these quantities are described as being dimensionless, or of dimension one, and have the coherent SI unit 1. Their values are simply expressed as numbers and, in general, the unit 1 is not explicitly shown. In a few cases, however, a special name is given to this unit, mainly to avoid confusion between some compound derived units. This is the case for the radian, steradian and neper.

## 3 Decimal multiples and submultiples of SI units

### 3.1 SI prefixes

The 11th CGPM (1960, Resolution 12; CR, 87) adopted a series of prefixes and prefix symbols to form the names and symbols of the decimal multiples and submultiples of SI units ranging from  $10^{12}$  to  $10^{-12}$ . Prefixes for  $10^{-15}$  and  $10^{-18}$  were added by the 12th CGPM (1964, Resolution 8; CR, 94), for  $10^{15}$  and  $10^{18}$  by the 15th CGPM (1975, Resolution 10; CR, 106 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180-181), and for  $10^{21}$ ,  $10^{24}$ ,  $10^{-21}$  and  $10^{-24}$  by the 19th CGPM (1991, Resolution 4; CR, 185 and *Metrologia*, 1992, **29**, 3). Table 5 lists all approved prefixes and symbols.

These SI prefixes refer strictly to powers of 10. They should not be used to indicate powers of 2 (for example, one kilobit represents 1000 bits and not 1024 bits).

**Table 5. SI prefixes**

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

### 3.2 The kilogram

Among the base units of the International System, the unit of mass is the only one whose name, for historical reasons, contains a prefix. Names and symbols for decimal multiples and submultiples of the unit of mass are formed by attaching prefix names to the unit name “gram” and prefix symbols to the unit symbol “g” (CIPM, 1967, Recommendation 2; PV, **35**, 29 and *Metrologia*, 1968, **4**, 45),

*Example:*  $10^{-6}$  kg = 1 mg (1 milligram)  
*but not* 1  $\mu$ kg (1 microkilo gram).

## 4 Units outside the SI

SI units are recommended for use throughout science, technology and commerce. They are agreed internationally by the CGPM, and provide the reference in terms of which all other units are now defined. The SI base units and SI derived units, including those with special names, have the important advantage of forming a coherent set with the effect that unit conversions are not required when inserting particular values for quantities in quantity equations.

Nonetheless it is recognized that some non-SI units still appear widely in the scientific, technical and commercial literature, and some will probably continue to be used for many years. Other non-SI units, such as the units of time, are so widely used in everyday life, and are so deeply embedded in the history and culture of the human race, that they will continue to be used for the foreseeable future. For these reasons some of the more important non-SI units are listed in the tables below.

The inclusion of tables of non-SI units in this text does not imply that the use of non-SI units is to be encouraged. With a few exceptions discussed below, SI units are always to be preferred to non-SI units. It is desirable to avoid combining non-SI units with units of the SI; in particular the combination of such units with SI units to form compound units should be restricted to special cases so as to retain the advantage of coherence conferred by the use of SI units.

### 4.1 Units used with the SI

The CIPM (1969), recognizing that users would wish to employ the SI with units which are not part of it but are important and widely used, listed three categories of non-SI units: units to be maintained; to be tolerated temporarily; and to be avoided. In reviewing this categorization the CIPM (1996) agreed a new classification of non-SI units: units accepted for use with the SI, Table 6; units accepted for use with the SI whose values are obtained experimentally, Table 7; and other units currently accepted for use with the SI to satisfy the needs of special interests, Table 8.

Table 6 lists non-SI units which are accepted for use with the SI. It includes units which are in continuous everyday use, in particular the traditional units of time and of angle, together with a few other units which have assumed increasing technical importance.



**Table 6. Non-SI units accepted for use with the International System**

Name	Symbol	Value in SI units
minute	min	1 min = 60 s
hour <sup>(a)</sup>	h	1 h = 60 min = 3600 s
day	d	1 d = 24 h = 86 400 s
degree <sup>(b)</sup>	°	1° = ( $\pi/180$ ) rad
minute	'	1' = (1/60)° = ( $\pi/10\ 800$ ) rad
second	"	1" = (1/60)' = ( $\pi/648\ 000$ ) rad
litre <sup>(c)</sup>	l, L	1 l = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
tonne <sup>(d, e)</sup>	t	1 t = 10 <sup>3</sup> kg
neper <sup>(f, h)</sup>	Np	1 Np = 1
bel <sup>(g, h)</sup>	B	1 B = (1/2) ln 10 (Np) <sup>(i)</sup>

(a) The symbol of this unit is included in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948; CR, 70).

(b) ISO 31 recommends that the degree be subdivided decimally rather than using the minute and second.

(c) This unit and the symbol l were adopted by CIPM in 1879 (PV, 1879, 41). The alternative symbol, L, was adopted by the 16th CGPM (1979, Resolution 6; CR, 101 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56-57) in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1.

The present definition of the litre is given in Resolution 6 of the 12th CGPM (1964; CR, 93).

(d) This unit and its symbol were adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41).

(e) In some English-speaking countries this unit is called "metric ton".

(f) The neper is used to express values of such logarithmic quantities as field level, power level, sound pressure level, and logarithmic decrement. Natural logarithms are used to obtain the numerical values of quantities expressed in nepers. The neper is coherent with the SI, but not yet adopted by the CGPM as an SI unit. For further information see International Standard ISO 31.

(g) The bel is used to express values of such logarithmic quantities as field level, power level, sound pressure level, and attenuation. Logarithms to base ten are used to obtain the numerical values of quantities expressed in bels. The submultiple decibel, dB, is commonly used. For further information see International Standard ISO 31.

(h) In using these units it is particularly important that the quantity be specified. The unit must not be used to imply the quantity.

(i) Np is enclosed in parentheses because, although the neper is coherent with the SI, it has not yet been adopted by the CGPM.

Table 7 lists three non-SI units which are also accepted for use with the SI, whose values expressed in SI units must be obtained by experiment and are therefore not known exactly. Their values are given with their combined standard uncertainties (coverage factor  $k = 1$ ), which apply to the last two digits, shown in parentheses. These units are in common use in certain specialized fields.

**Table 7. Non-SI units accepted for use with the International System, whose values in SI units are obtained experimentally**

Name	Symbol	Definition	Value in SI units
electronvolt <sup>(a)</sup>	eV	<sup>(b)</sup>	1 eV = 1.602 177 33 (49) × 10 <sup>-19</sup> J
unified atomic mass unit <sup>(a)</sup>	u	<sup>(c)</sup>	1 u = 1.660 540 2 (10) × 10 <sup>-27</sup> kg
astronomical unit <sup>(a)</sup>	ua	<sup>(d)</sup>	1 ua = 1.495 978 706 91 (30) × 10 <sup>11</sup> m

<sup>(a)</sup> For the electronvolt and the unified atomic mass unit, values are quoted from *CODATA Bulletin*, 1986, No. 63.

The value given for the astronomical unit is quoted from the IERS Conventions (1996), D.D. McCarthy ed., *IERS Technical Note 21*, Observatoire de Paris, July 1996.

<sup>(b)</sup> The electronvolt is the kinetic energy acquired by an electron in passing through a potential difference of 1 V in vacuum.

<sup>(c)</sup> The unified atomic mass unit is equal to 1/12 of the mass of an unbound atom of the nuclide <sup>12</sup>C, at rest, and in its ground state. In the field of biochemistry, the unified atomic mass unit is also called the dalton, symbol Da.

<sup>(d)</sup> The astronomical unit is a unit of length approximately equal to the mean Earth-Sun distance. Its value is such that, when used to describe the motion of bodies in the Solar System, the heliocentric gravitational constant is (0.017 202 098 95)<sup>2</sup> ua<sup>3</sup> · d<sup>-2</sup>.

Table 8 lists some other non-SI units which are currently accepted for use with the SI to satisfy the needs of commercial, legal and specialized scientific interests. These units should be defined in relation to the SI in every document in which they are used. Their use is not encouraged.

**Table 8. Other non-SI units currently accepted for use with the International System**

Name	Symbol	Value in SI units
nautical mile <sup>(a)</sup>		1 nautical mile = 1852 m
knot		1 nautical mile per hour = (1852/3600) m/s
are <sup>(b)</sup>	a	1 a = 1 dam <sup>2</sup> = 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
hectare <sup>(b)</sup>	ha	1 ha = 1 hm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
bar <sup>(c)</sup>	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 <sup>5</sup> Pa
ångström	Å	1 Å = 0.1 nm = 10 <sup>-10</sup> m
barn <sup>(d)</sup>	b	1 b = 100 fm <sup>2</sup> = 10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

<sup>(a)</sup> The nautical mile is a special unit employed for marine and aerial navigation to express distance. The conventional value given above was adopted by the First International Extraordinary Hydrographic Conference, Monaco, 1929, under the name “International nautical mile”. As yet there is no internationally agreed symbol. This unit was originally chosen because one nautical mile on the surface of the Earth subtends approximately one minute of angle at the centre.

<sup>(b)</sup> The units are are and hectare and their symbols were adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41) and are used to express areas of land.

<sup>(c)</sup> The bar and its symbol are included in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948; CR, 70).

<sup>(d)</sup> The barn is a special unit employed in nuclear physics to express effective cross-sections.

## 4.2 Other non-SI units

Certain other non-SI units are still occasionally used. Some are important for the interpretation of older scientific texts. These are listed in Tables 9 and 10, but their use is not encouraged.

Table 9 deals with the relationship between CGS units and the SI, and lists those CGS units that were assigned special names. In the field of mechanics, the CGS system of units was built upon three quantities and the corresponding base units: the centimetre, the gram and the second. In the field of electricity and magnetism, units were expressed in terms of these three base units. Because this can be done in different ways, it led to the establishment of several different systems, for example the CGS Electrostatic System, the CGS Electromagnetic System and the CGS Gaussian System. In these three last-mentioned systems, the system of quantities and the corresponding system of equations differ from those used with SI units.

**Table 9. Derived CGS units with special names**

Name	Symbol	Value in SI units
erg <sup>(a)</sup>	erg	1 erg = 10 <sup>-7</sup> J
dyne <sup>(a)</sup>	dyn	1 dyn = 10 <sup>-5</sup> N
poise <sup>(a)</sup>	P	1 P = 1 dyn · s/cm <sup>2</sup> = 0.1 Pa · s
stokes	St	1 St = 1 cm <sup>2</sup> /s = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
gauss <sup>(b)</sup>	G	1 G ^ 10 <sup>-4</sup> T
oersted <sup>(b)</sup>	Oe	1 Oe ^ (1000/4π) A/m
maxwell <sup>(b)</sup>	Mx	1 Mx ^ 10 <sup>-8</sup> Wb
stilb <sup>(a)</sup>	sb	1 sb = 1 cd/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
phot	ph	1 ph = 10 <sup>4</sup> lx
gal <sup>(c)</sup>	Gal	1 Gal = 1 cm/s <sup>2</sup> = 10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

(a) This unit and its symbol were included in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948; CR, 70).

(b) This unit is part of the so-called “electromagnetic” three-dimensional CGS system and cannot strictly be compared with the corresponding unit of the International System, which has four dimensions when only mechanical and electric quantities are considered. For this reason, this unit is linked to the SI unit using the mathematical symbol for “corresponds to” (^).

(c) The gal is a special unit employed in geodesy and geophysics to express acceleration due to gravity.

Table 10 lists units which are common in older texts. For current texts, it should be noted that if these units are used the advantages of the SI are lost. The relation of these units to the SI should be specified in every document in which they are used.

Table 10. Examples of other non-SI units

Name	Symbol	Value in SI units
curie <sup>(a)</sup>	Ci	1 Ci = $3.7 \times 10^{10}$ Bq
röntgen <sup>(b)</sup>	R	1 R = $2.58 \times 10^{-4}$ C/kg
rad <sup>(c,f)</sup>	rad	1 rad = 1 cGy = $10^{-2}$ Gy
rem <sup>(d,f)</sup>	rem	1 rem = 1 cSv = $10^{-2}$ Sv
X unit <sup>(e)</sup>		1 X unit $\approx 1.002 \times 10^{-4}$ nm
gamma <sup>(f)</sup>	$\gamma$	1 $\gamma$ = 1 nT = $10^{-9}$ T
jansky	Jy	1 Jy = $10^{-26}$ W · m <sup>-2</sup> · Hz <sup>-1</sup>
fermi <sup>(f)</sup>		1 fermi = 1 fm = $10^{-15}$ m
metric carat <sup>(g)</sup>		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg
torr	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
standard atmosphere	atm <sup>(h)</sup>	1 atm = 101 325 Pa
calorie	cal	<sup>(i)</sup>
micron <sup>(f)</sup>	$\mu$ <sup>(j)</sup>	1 $\mu$ = 1 $\mu$ m = $10^{-6}$ m

(a) The curie is a special unit employed in nuclear physics to express activity of radionuclides (12th CGPM, 1964, Resolution 7; CR, 94).

(b) The röntgen is a special unit employed to express exposure to x or  $\gamma$  radiation.

(c) The rad is a special unit employed to express absorbed dose of ionizing radiation.

When there is risk of confusion with the symbol for radian, rd may be used as the symbol for rad.

(d) The rem is a special unit used in radioprotection to express dose equivalent.

(e) The X unit was employed to express the wavelengths of x rays. Its relationship with the SI unit is an approximate one.

(f) Note that this non-SI unit is exactly equivalent to an SI unit with an appropriate submultiple prefix.

(g) The metric carat was adopted by the 4th CGPM in 1907 (CR, 89-91) for commercial dealings in diamonds, pearls and precious stones.

(h) Resolution 4 of the 10th CGPM (1954; CR, 79). The designation “standard atmosphere” for a reference pressure of 101 325 Pa is still acceptable.

(i) Several “calories” have been in use:

- a calorie labelled “at 15 °C”: 1 cal<sub>15</sub> = 4.1855 J (value adopted by the CIPM in 1950; PV, 1950, 22, 79-80);
- a calorie labelled “IT” (International Table): 1 cal<sub>IT</sub> = 4.1868 J (5th International Conference on the Properties of Steam, London, 1956);
- a calorie labelled “thermochemical”: 1 cal<sub>th</sub> = 4.184 J.

(j) The micron and its symbol, adopted by the CIPM in 1879 (PV, 1879, 41) and repeated in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948; CR, 70) were abolished by the 13th CGPM (1967-1968, Resolution 7; CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44).

## 5 The writing of SI names and symbols

### 5.1 General principles

General principles for the writing of unit symbols and numbers were first proposed by the 9th CGPM (1948, Resolution 7). These were subsequently adopted and elaborated by ISO/TC 12 (ISO 31, *Quantities and units*).

### 5.2 SI unit symbols

SI unit symbols (and also many non-SI unit symbols) are written as follows:

1. Roman (upright) type is used for the unit symbols. In general, unit symbols are written in lower case, but, if the name of the unit is derived from the proper name of a person, the first letter of the symbol is a capital. When the name of a unit is spelled out, it is always written in lower case, except when the name is the first word of a sentence or is the name “degree Celsius”.
2. Unit symbols are unaltered in the plural.
3. Unit symbols are not followed by a full stop (period), except as normal punctuation at the end of a sentence.

### 5.3 Algebra of SI unit symbols

In accord with the general principles adopted by ISO/TC 12 (ISO 31), the CIPM recommends that algebraic expressions involving SI unit symbols be expressed in standard forms.

1. Half-high dots or spaces are used to express a derived unit formed from two or more other units by multiplication.

*Example:* N · m or N m.

2. A solidus (oblique stroke, /), a horizontal line, or a negative exponent is used to express a derived unit formed from two other units by division.

*Example:* m/s or  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  or  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

3. The solidus is not followed by a multiplication sign or by a division sign on the same line unless ambiguity is avoided by parentheses. In complicated cases, negative exponents or parentheses are used to avoid ambiguity.

Examples:  $\text{m/s}^2$  or  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  but not  $\text{m/s/s}$   
 $\text{m} \cdot \text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{A})$  or  $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$  but neither  $\text{m} \cdot \text{kg/s}^3/\text{A}$   
 nor  $\text{m} \cdot \text{kg/s}^3 \cdot \text{A}$ .

## 5.4 Rules for using SI prefixes

In accord with the general principles adopted by the ISO (ISO 31), the CIPM recommends that the following rules be observed when using the SI prefixes:

1. Prefix symbols are printed in roman (upright) type with no space between the prefix symbol and the unit symbol.
2. The grouping formed by the prefix symbol attached to the unit symbol constitutes a new inseparable symbol (of a multiple or submultiple of the unit concerned) which can be raised to a positive or negative power and combined with other unit symbols to form compound unit symbols.

Examples:

$$1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ } \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

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

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

3. Compound prefixes, i.e. prefixes formed by the juxtaposition of two or more SI prefixes, are not used.

Example: 1 nm but not 1 m $\mu$ m.

4. A prefix is never used in isolation.

Example:  $10^6/\text{m}^3$  but not  $\text{M}/\text{m}^3$ .

## Appendix 1. Decisions of the CGPM and the CIPM

This appendix lists those decisions of the CGPM and the CIPM which bear directly upon definitions of the units of the SI, prefixes defined for use as part of the SI, and conventions for the writing of unit symbols and numbers. It is not a complete list of CGPM and CIPM decisions. For a complete list, reference must be made to successive volumes of the *Comptes Rendus des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CR)* and *Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures (PV)* or, for recent decisions, to *Metrologia*.

Since the SI is not a static convention, but evolves following developments in the science of measurement, some decisions have been abrogated or modified; others have been clarified by additions. Decisions which have been subject to such changes are identified by an asterisk (\*) and are linked by a note to the modifying decision.

The original text of each decision (or its translation) is shown in a different font of normal weight to distinguish it from the main text. The asterisks and notes were added by the BIPM to make the text more understandable. They do not form part of the original text.

### 1 Decisions relating to the establishment of the *Système International d'Unités*, SI

#### 1.1 Practical system of units: establishment of the SI

##### ■ 9th CGPM, 1948, Resolution 6 (CR, 64): proposal for establishing a practical system of units of measurement

The Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) has been requested by the International Union of Physics to adopt for international use a practical *Système International d'Unités*; that the International Union of Physics recommends the MKS system and one electric unit of the absolute practical system, but does not recommend that the CGS system be abandoned by physicists;
- that the CGPM has itself received from the French Government a similar request, accompanied by a draft to be used as basis of discussion for the establishment of a complete specification of units of measurement;

**instructs** the CIPM:

- to seek by an energetic, active, official enquiry the opinion of scientific, technical and educational circles of all countries (offering them, in fact, the French document as basis);
- to gather and study the answers;
- to make recommendations for a single practical system of units of measurement, suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention.

■ **10th CGPM, 1954, Resolution 6 (CR, 80): practical system of units\***

In accordance with the wish expressed by the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in its Resolution 6 concerning the establishment of a practical system of units of measurement for international use, the 10th CGPM

**decides** to adopt as base units of the system, the following units:

length	metre
mass	kilogram
time	second
electric current	ampere
thermodynamic temperature	degree Kelvin
luminous intensity	candela

\* The unit name “degree kelvin” was changed to “kelvin” in 1967 (13th CGPM, Resolution 3, see p. 123).

## 1.2 The SI

■ **CIPM, 1956, Resolution 3 (PV, 25, 83): Système International d’Unités**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering**

- the task entrusted to it by Resolution 6 of the 9th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) concerning the establishment of a practical system of units of measurement suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention,
- the documents received from twenty-one countries in reply to the enquiry requested by the 9th CGPM,
- Resolution 6 of the 10th CGPM, fixing the base units of the system to be established,

**recommends**

1. that the name “Système International d’Unités” be given to the system founded on the base units adopted by the 10th CGPM, viz.:  
[This is followed by the list of the six base units with their symbols, reproduced in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].
2. that the units listed in the table below be used, without excluding others which might be added later:  
[This is followed by the table of units reproduced in paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].



**■ 11th CGPM, 1960, Resolution 12 (CR, 87): Système International d’Unités\***

\* The CGPM later abrogated certain of its decisions and extended the list of prefixes: see notes below.

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), **considering**

- Resolution 6 of the 10th CGPM, by which it adopted six base units on which to establish a practical system of measurement for international use:

length	metre	m
mass	kilogram	kg
time	second	s
electric current	ampere	A
thermodynamic temperature	degree Kelvin	°K
luminous intensity	candela	cd

The name and symbol for the unit of thermodynamic temperature were modified by the 13th CGPM (1967-1968, Resolution 3, see p. 123).

- Resolution 3 adopted by the Comité international des Poids et Mesures (CIPM) in 1956,
- the recommendations adopted by the CIPM in 1958 concerning an abbreviation for the name of the system, and prefixes to form multiples and submultiples of the units,

**decides**

1. the system founded on the six base units above is called the “Système International d’Unités”;
2. the international abbreviation of the name of the system is: SI;
3. names of multiples and submultiples of the units are formed by means of the following prefixes:

A seventh base unit, the mole, was adopted by the 14th CGPM (1971, Resolution 3, see p. 124).

Multiplying factor	Prefix	Symbol	Multiplying factor	Prefix	Symbol
1 000 000 000 000 = 10 <sup>12</sup>	tera	T	0.1 = 10 <sup>-1</sup>	deci	d
1 000 000 000 = 10 <sup>9</sup>	giga	G	0.01 = 10 <sup>-2</sup>	centi	c
1 000 000 = 10 <sup>6</sup>	mega	M	0.001 = 10 <sup>-3</sup>	milli	m
1 000 = 10 <sup>3</sup>	kilo	k	0.000 001 = 10 <sup>-6</sup>	micro	μ
100 = 10 <sup>2</sup>	hecto	h	0.000 000 001 = 10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 = 10 <sup>1</sup>	deca	da	0.000 000 000 001 = 10 <sup>-12</sup>	pico	p

Further prefixes were adopted by the 12th CGPM (1964, Resolution 8, see p. 129), the 15th CGPM (1975, Resolution 10, see p. 129) and the 19th CGPM (1991, Resolution 4, see p. 129).

4. the units listed below are used in the system, without excluding others which might be added later.

**Supplementary units**

plane angle	radian	rad
solid angle	steradian	sr

The 20th CGPM abrogated the class of supplementary units in the SI (1995, Resolution 8, see p. 128). These are now considered to be derived units.

**Derived units**

area	square metre	$m^2$	
volume	cubic metre	$m^3$	
frequency	hertz	Hz	1/s
mass density (density)	kilogramme per cubic metre	$kg/m^3$	
speed, velocity	metre per second	m/s	
angular velocity	radian per second	rad/s	
acceleration	metre per second squared	$m/s^2$	
angular acceleration	radian per second squared	$rad/s^2$	
force	newton	N	$kg \cdot m/s^2$
pressure (mechanical stress)	newton per square metre	$N/m^2$	
kinematic viscosity	square metre per second	$m^2/s$	
dynamic viscosity	newton-second per square metre	$N \cdot s/m^2$	
work, energy, quantity of heat	joule	J	$N \cdot m$
power	watt	W	J/s
quantity of electricity	coulomb	C	$A \cdot s$
tension (voltage), potential difference, electromotive force	volt	V	W/A
electric field strength	volt per metre	V/m	
electric resistance	ohm	$\Omega$	V/A
capacitance	farad	F	$A \cdot s/V$
magnetic flux	weber	Wb	$V \cdot s$
inductance	henry	H	$V \cdot s/A$
magnetic flux density	tesla	T	$Wb/m^2$
magnetic field strength	ampere per metre	A/m	
magnetomotive force	ampere	A	
luminous flux	lumen	lm	$cd \cdot sr$
luminance	candela per square metre	$cd/m^2$	
illuminance	lux	lx	$lm/m^2$

The 13th CGPM (1967-1968, Resolution 6, see p. 126) specified other units which should be added to this list. In principle, this list of derived units is without limit.

■ **CIPM, 1969, Recommendation 1 (PV, 37, 30 and *Metrologia*, 1970, 6, 66):  
Système International d'Unités, Rules for application of Resolution 12 of  
the 11th CGPM (1960)\***

The Comité International des Poids et Mesures,  
**considering** that Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et  
Mesures (CGPM) (1960), concerning the Système International d'Unités, has  
provoked discussions on certain of its aspects,

**declares**

1. the base units, the supplementary units and the derived units of the Système International d'Unités, which form a coherent set, are denoted by the name "SI units";
2. the prefixes adopted by the CGPM for the formation of decimal multiples and submultiples of SI units are called "SI prefixes";

\* The 20th CGPM decided to abrogate the class of supplementary units in the SI (1995, Resolution 8, see p. 128).

and **recommends**

3. the use of SI units and of their decimal multiples and submultiples whose names are formed by means of SI prefixes.

Note: The name "supplementary units", appearing in Resolution 12 of the 11th CGPM (and in the present Recommendation) is given to SI units for which the General Conference declines to state whether they are base units or derived units.

## 2 Decisions relating to base units of the *Système International*

### 2.1 Length

#### ■ 1st CGPM, 1889 (CR, 34-38): sanction of the international prototypes of the metre and the kilogram\*

The Conférence Générale des Poids et Mesures,

##### considering

- the "Compte rendu of the President of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM)" and the "Report of the CIPM", which show that, by the collaboration of the French section of the International Metre Commission and of the CIPM, the fundamental measurements of the international and national prototypes of the metre and of the kilogram have been made with all the accuracy and reliability which the present state of science permits;
- that the international and national prototypes of the metre and the kilogram are made of an alloy of platinum with 10 per cent iridium, to within 0.0001;
- the equality in length of the international Metre and the equality in mass of the international Kilogram with the length of the Metre and the mass of the Kilogram kept in the Archives of France;
- that the differences between the national Metres and the international Metre lie within 0.01 millimetre and that these differences are based on a hydrogen thermometer scale which can always be reproduced thanks to the stability of hydrogen, provided identical conditions are secured;
- that the differences between the national Kilograms and the international Kilogram lie within 1 milligram;
- that the international Metre and Kilogram and the national Metres and Kilograms fulfil the requirements of the Metre Convention,

##### sanctions

A. As regards international prototypes:

1. The Prototype of the metre chosen by the CIPM. This prototype, at the temperature of melting ice, shall henceforth represent the metric unit of length.
2. The Prototype of the kilogram adopted by the CIPM. This prototype shall henceforth be considered as the unit of mass.
3. The hydrogen thermometer centigrade scale in terms of which the equations of the prototype Metres have been established.

B. As regards national prototypes:

...

\* The definition of the metre was abrogated in 1960 (11th CGPM, Resolution 6, given below).

■ **7th CGPM, 1927 (CR, 49): definition of the metre by the international Prototype\***

The unit of length is the metre, defined by the distance, at 0°, between the axes of the two central lines marked on the bar of platinum-iridium kept at the Bureau International des Poids et Mesures and declared Prototype of the metre by the 1st Conférence Générale des Poids et Mesures, this bar being subject to standard atmospheric pressure and supported on two cylinders of at least one centimetre diameter, symmetrically placed in the same horizontal plane at a distance of 571 mm from each other.

\* This definition was abrogated in 1960 (11th CGPM, Resolution 6, given below).

■ **11th CGPM, 1960, Resolution 6 (CR, 85): definition of the metre\***

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that the international Prototype does not define the metre with an accuracy adequate for the present needs of metrology,
- that it is moreover desirable to adopt a natural and indestructible standard,

**decides**

1. The metre is the length equal to 1 650 763.73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the krypton 86 atom.
2. The definition of the metre in force since 1889, based on the international Prototype of platinum-iridium, is abrogated.
3. The international Prototype of the metre sanctioned by the 1st CGPM in 1889 shall be kept at the BIPM under the conditions specified in 1889.

\* This definition was abrogated in 1983 (17th CGPM, Resolution 1, given below).

■ **15th CGPM, 1975, Resolution 2 (CR, 103 and *Metrologia*, 1975, 11, 179-180): recommended value for the speed of light**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** the excellent agreement among the results of wavelength measurements on the radiations of lasers locked on a molecular absorption line in the visible or infrared region, with an uncertainty estimated at  $\pm 4 \times 10^{-9}$  which corresponds to the uncertainty of the realization of the metre,

**considering** also the concordant measurements of the frequencies of several of these radiations,

**recommends** the use of the resulting value for the speed of propagation of electromagnetic waves in vacuum  $c = 299\,792\,458$  metres per second.

The relative uncertainty quoted here is believed to correspond to three standard deviations in the data considered.

■ **17th CGPM, 1983, Resolution 1 (CR, 97 and *Metrologia*, 1984, 20, 25): definition of the metre**

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that the present definition does not allow a sufficiently precise realization of the metre for all requirements,

- that progress made in the stabilization of lasers allows radiations to be obtained that are more reproducible and easier to use than the standard radiation emitted by a krypton 86 lamp,
- that progress made in the measurement of the frequency and wavelength of these radiations has resulted in concordant determinations of the speed of light whose accuracy is limited principally by the realization of the present definition of the metre,
- that wavelengths determined from frequency measurements and a given value for the speed of light have a reproducibility superior to that which can be obtained by comparison with the wavelength of the standard radiation of krypton 86,
- that there is an advantage, notably for astronomy and geodesy, in maintaining unchanged the value of the speed of light recommended in 1975 by the 15th CGPM in its Resolution 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s),
- that a new definition of the metre has been envisaged in various forms all of which have the effect of giving the speed of light an exact value, equal to the recommended value, and that this introduces no appreciable discontinuity into the unit of length, taking into account the relative uncertainty of  $\pm 4 \times 10^{-9}$  of the best realizations of the present definition of the metre,
- that these various forms, making reference either to the path travelled by light in a specified time interval or to the wavelength of a radiation of measured or specified frequency, have been the object of consultations and deep discussions, have been recognized as being equivalent and that a consensus has emerged in favour of the first form,
- that the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) is now in a position to give instructions for the practical realization of such a definition, instructions which could include the use of the orange radiation of krypton 86 used as standard up to now, and which may in due course be extended or revised,

The relative uncertainty given here corresponds to three standard deviations in the data considered.

**decides**

1. The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of  $1/299\,792\,458$  of a second.
2. The definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels  $2p_{10}$  and  $5d_5$  of the atom of krypton 86, is abrogated.

**■ 17th CGPM, 1983, Resolution 2 (CR, 98 and *Metrologia*, 1984, 20, 25-26): on the realization of the definition of the metre**

The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures

**invites** the Comité International des Poids et Mesures

- to draw up instructions for the practical realization of the new definition of the metre,
- to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and to draw up instructions for their use,
- to pursue studies undertaken to improve these standards.

See Recommendation 1 (CI-1997) of the CIPM on the revision of the practical realization of the definition of the metre (Appendix 2, p. 133).

## 2.2 Mass

### ■ 1st CGPM, 1889 (CR, 34-38): sanction of the international prototypes of the metre and the kilogram

(see p. 115)

### ■ 3rd CGPM, 1901 (CR, 70): declaration on the unit of mass and on the definition of weight; conventional value of $g_n$

**Taking into account** the decision of the Comité International des Poids et Mesures of 15 October 1887, according to which the kilogram has been defined as unit of mass;

**Taking into account** the decision contained in the sanction of the prototypes of the Metric System, unanimously accepted by the Conférence Générale des Poids et Mesures on 26 September 1889;

**Considering** the necessity to put an end to the ambiguity which in current practice still exists on the meaning of the word *weight*, used sometimes for *mass*, sometimes for *mechanical force*;

#### The Conference declares

1. The kilogram is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram;
2. The word "weight" denotes a quantity of the same nature as a "force": the weight of a body is the product of its mass and the acceleration due to gravity; in particular, the standard weight of a body is the product of its mass and the standard acceleration due to gravity;
3. The value adopted in the International Service of Weights and Measures for the standard acceleration due to gravity is  $980.665 \text{ cm/s}^2$ , value already stated in the laws of some countries.

This value of  $g_n$  was the conventional reference for calculating the now obsolete unit kilogram force.

### ■ CIPM, 1967, Recommendation 2 (PV, 35, 29 and *Metrologia*, 1968, 4, 45): decimal multiples and submultiples of the unit of mass

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** that the rule for forming names of decimal multiples and submultiples of the units of paragraph 3 of Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) (1960) might be interpreted in different ways when applied to the unit of mass,

**declares** that the rules of Resolution 12 of the 11th CGPM apply to the kilogram in the following manner: the names of decimal multiples and submultiples of the unit of mass are formed by attaching prefixes to the word "gram".

## 2.3 Time

### ■ CIPM, 1956, Resolution 1 (PV, 25, 77): definition of the unit of time (second)\*

In virtue of the powers invested in it by Resolution 5 of the 10th Conférence Générale des Poids et Mesures, the Comité International des Poids et Mesures,

#### considering

1. that the 9th General Assembly of the International Astronomical Union (Dublin, 1955) declared itself in favour of linking the second to the tropical year,

\* This definition was abrogated in 1967 (13th CGPM, Resolution 1, given below).

2. that, according to the decisions of the 8th General Assembly of the International Astronomical Union (Rome, 1952), the second of ephemeris time (ET) is the fraction

$$\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9} \text{ of the tropical year for 1900 January 0 at 12 h ET,}$$

**decides** “The second is the fraction 1/31 556 925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time.”

■ **11th CGPM, 1960, Resolution 9 (CR, 86): definition of the unit of time (second)\***

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- the powers given to the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) by the 10th CGPM to define the fundamental unit of time,
- the decision taken by the CIPM in 1956,

**ratifies** the following definition:

“The second is the fraction 1/31 556 925.9747 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time.”

\* This definition was abrogated in 1967 (13th CGPM, Resolution 1, given below).

■ **12th CGPM, 1964, Resolution 5 (CR, 93): atomic standard of frequency**

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th CGPM noted in its Resolution 10 the urgency, in the interests of accurate metrology, of adopting an atomic or molecular standard of time interval,
- that, in spite of the results already obtained with caesium atomic frequency standards, the time has not yet come for the CGPM to adopt a new definition of the second, base unit of the Système International d’Unités, because of the new and considerable improvements likely to be obtained from work now in progress,

**considering also** that it is not desirable to wait any longer before time measurements in physics are based on atomic or molecular frequency standards,

**empowers** the Comité International des Poids et Mesures to name the atomic or molecular frequency standards to be employed for the time being,

**requests** the organizations and laboratories knowledgeable in this field to pursue work connected with a new definition of the second.

■ **Declaration of the CIPM, 1964 (PV, 32, 26 and CR, 93)**

The Comité International des Poids et Mesures,

**empowered** by Resolution 5 of the 12th Conférence Générale des Poids et Mesures to name atomic or molecular frequency standards for temporary use for time measurements in physics,

**declares** that the standard to be employed is the transition between the hyperfine levels  $F = 4, M = 0$  and  $F = 3, M = 0$  of the ground state  $^2S_{1/2}$  of the caesium 133 atom, unperturbed by external fields, and that the frequency of this transition is assigned the value 9 192 631 770 hertz.

■ **13th CGPM, 1967-1968, Resolution 1 (CR, 103 and *Metrologia*, 1968, 4, 43): SI unit of time (second)**

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the definition of the second adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1956 (Resolution 1) and ratified by Resolution 9 of the 11th CGPM (1960), later upheld by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), is inadequate for the present needs of metrology,
- that at its meeting of 1964 the Comité International des Poids et Mesures (CIPM), empowered by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), recommended, in order to fulfil these requirements, a caesium atomic frequency standard for temporary use,
- that this frequency standard has now been sufficiently tested and found sufficiently accurate to provide a definition of the second fulfilling present requirements,
- that the time has now come to replace the definition now in force of the unit of time of the Système International d'Unités by an atomic definition based on that standard,

**decides**

1. The SI unit of time is the second defined as follows:  
 "The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium 133 atom" ;
2. Resolution 1 adopted by the CIPM at its meeting of 1956 and Resolution 9 of the 11th CGPM are now abrogated.

At its 1997 meeting, the CIPM affirmed that this definition refers to a caesium atom in its ground state at a thermodynamic temperature of 0 K.

■ **14th CGPM, 1971, Resolution 1 (CR, 77 and *Metrologia*, 1972, 8, 35): International Atomic Time, function of CIPM**

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the second, unit of time of the Système International d'Unités, has since 1967 been defined in terms of a natural atomic frequency, and no longer in terms of the time scales provided by astronomical motions,
- that the need for an International Atomic Time (TAI) scale is a consequence of the atomic definition of the second,
- that several international organizations have ensured and are still successfully ensuring the establishment of the time scales based on astronomical motions, particularly thanks to the permanent services of the Bureau International de l'Heure (BIH),
- that the BIH has started to establish an atomic time scale of recognized quality and proven usefulness,
- that the atomic frequency standards for realizing the second have been considered and must continue to be considered by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) helped by a Consultative Committee, and that the unit interval of the International Atomic Time scale must be the second realized according to its atomic definition,



- that all the competent international scientific organizations and the national laboratories active in this field have expressed the wish that the CIPM and the CGPM should give a definition of International Atomic Time, and should contribute to the establishment of the International Atomic Time scale,
- that the usefulness of International Atomic Time entails close coordination with the time scales based on astronomical motions,

**requests** the CIPM

1. to give a definition of International Atomic Time,
2. to take the necessary steps, in agreement with the international organizations concerned, to ensure that available scientific competence and existing facilities are used in the best possible way to realize the International Atomic Time scale and to satisfy the requirements of users of International Atomic Time.

For the CIPM and CCDS (now the CCTF) recommendations concerning the definition of International Atomic Time, see Appendix 2, p. 142.

■ **15th CGPM, 1975, Resolution 5 (CR, 104 and *Metrologia*, 1975, 11, 180): Coordinated Universal Time (UTC)**

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering** that the system called “Coordinated Universal Time” (UTC) is widely used, that it is broadcast in most radio transmissions of time signals, that this wide diffusion makes available to the users not only frequency standards but also International Atomic Time and an approximation to Universal Time (or, if one prefers, mean solar time),

**notes** that this Coordinated Universal Time provides the basis of civil time, the use of which is legal in most countries,

**judges** that this usage can be strongly endorsed.

## 2.4 Electric current

■ **CIPM, 1946, Resolution 2 (PV, 20, 129-137): definitions of electric units**

...

4. (A) Definitions of the mechanical units which enter the definitions of electric units:

**Unit of force** — The unit of force [in the MKS (metre, kilogram, second) system] is the force which gives to a mass of 1 kilogram an acceleration of 1 metre per second, per second.

**Joule** (unit of energy or work) — The joule is the work done when the point of application of 1 MKS unit of force [newton] moves a distance of 1 metre in the direction of the force.

**Watt** (unit of power) — The watt is the power which in one second gives rise to energy of 1 joule.

(B) Definitions of electric units. The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) accepts the following propositions which define the theoretical value of the electric units:

**Ampere** (unit of electric current) — The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible

The definitions contained in this Resolution were ratified by the 9th CGPM, 1948 (CR, 49), which also adopted the name *newton* (Resolution 7) for the MKS unit of force.

circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to  $2 \times 10^{-7}$  MKS unit of force [newton] per metre of length.

**Volt** (unit of potential difference and of electromotive force) — The volt is the potential difference between two points of a conducting wire carrying a constant current of 1 ampere, when the power dissipated between these points is equal to 1 watt.

**Ohm** (unit of electric resistance) — The ohm is the electric resistance between two points of a conductor when a constant potential difference of 1 volt, applied to these points, produces in the conductor a current of 1 ampere, the conductor not being the seat of any electromotive force.

**Coulomb** (unit of quantity of electricity) — The coulomb is the quantity of electricity carried in 1 second by a current of 1 ampere.

**Farad** (unit of capacitance) — The farad is the capacitance of a capacitor between the plates of which there appears a potential difference of 1 volt when it is charged by a quantity of electricity of 1 coulomb.

**Henry** (unit of electric inductance) — The henry is the inductance of a closed circuit in which an electromotive force of 1 volt is produced when the electric current in the circuit varies uniformly at the rate of 1 ampere per second.

**Weber** (unit of magnetic flux) — The weber is the magnetic flux which, linking a circuit of one turn, would produce in it an electromotive force of 1 volt if it were reduced to zero at a uniform rate in 1 second.

#### ■ 14th CGPM, 1971 (CR, 78): pascal, siemens

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures adopted the special names “pascal” (symbol Pa), for the SI unit newton per square metre, and “siemens” (symbol S), for the SI unit of electric conductance [reciprocal ohm].

## 2.5 Thermodynamic temperature

#### ■ 9th CGPM, 1948, Resolution 3 (CR, 55 and 63): triple point of water; thermodynamic scale with a single fixed point; unit of quantity of heat (joule)

1. With present-day techniques, the triple point of water is capable of providing a thermometric reference point with an accuracy higher than can be obtained from the melting point of ice.

In consequence the Comité Consultatif de Thermométrie et Calorimétrie (CCTC) considers that the zero of the centesimal thermodynamic scale must be defined as the temperature 0.0100 degree below that of the triple point of water.

2. The CCTC accepts the principle of an absolute thermodynamic scale with a single fundamental fixed point, at present provided by the triple point of pure water, the absolute temperature of which will be fixed at a later date.  
The introduction of this new scale does not affect in any way the use of the International Scale, which remains the recommended practical scale.

3. The unit of quantity of heat is the joule.

Note: It is requested that the results of calorimetric experiments be as far as possible expressed in joules. If the experiments are made by comparison with the rise of temperature of water (and that, for some reason, it is not possible to avoid using the calorie), the information necessary for conversion to joules must be provided. The CIPM, advised by the CCTC, should prepare a table giving, in joules per degree, the most accurate values that can be obtained from experiments on the specific heat of water.

A table, prepared in response to this request, was approved and published by the CIPM in 1950 (PV, 22, 92).

■ **CIPM, 1948 (PV, 21, 88) and 9th CGPM, 1948 (CR, 64): adoption of “degree Celsius”**

From three names (“degree centigrade”, “centesimal degree”, “degree Celsius”) proposed to denote the degree of temperature, the CIPM has chosen “degree Celsius” (PV, 21, 88).

This name is also adopted by the 9th CGPM (CR, 64).

■ **10th CGPM, 1954, Resolution 3 (CR, 79): definition of the thermodynamic temperature scale\***

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures decides to define the thermodynamic temperature scale by choosing the triple point of water as the fundamental fixed point, and assigning to it the temperature 273.16 degrees Kelvin, exactly.

\* The 13th CGPM (1967-1968, Resolution 4, given below) explicitly defined the kelvin.

■ **10th CGPM, 1954, Resolution 4 (CR, 79): definition of the standard atmosphere**

The 10th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), having noted that the definition of the standard atmosphere given by the 9th CGPM when defining the International Temperature Scale led some physicists to believe that this definition of the standard atmosphere was valid only for accurate work in thermometry, **declares** that it adopts, for general use, the definition:

1 standard atmosphere = 1 013 250 dynes per square centimetre,  
i.e., 101 325 newtons per square metre.

■ **13th CGPM, 1967-1968, Resolution 3 (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43): SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)\***

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), **considering**

- the names “degree Kelvin” and “degree”, the symbols “°K” and “deg” and the rules for their use given in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948), in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960), and the decision taken by the Comité International des Poids et Mesures in 1962 (PV, 30, 27),
- that the unit of thermodynamic temperature and the unit of temperature interval are one and the same unit, which ought to be denoted by a single name and a single symbol,

\* At its 1980 meeting the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU which requested that the use of the symbols “°K” and “deg” no longer be permitted.

**decides**

1. the unit of thermodynamic temperature is denoted by the name "kelvin" and its symbol is "K";
2. the same name and the same symbol are used to express a temperature interval;
3. a temperature interval may also be expressed in degrees Celsius;
4. the decisions mentioned in the opening paragraph concerning the name of the unit of thermodynamic temperature, its symbol and the designation of the unit to express an interval or a difference of temperatures are abrogated, but the usages which derive from these decisions remain permissible for the time being.

■ **13th CGPM, 1967-1968, Resolution 4 (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43): definition of the SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)\***

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** that it is useful to formulate more explicitly the definition of the unit of thermodynamic temperature contained in Resolution 3 of the 10th CGPM (1954),

**decides** to express this definition as follows:

"The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273.16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water."

\*See Recommendation 5 (CI-1989) of the CIPM on the International Temperature Scale of 1990 (Appendix 2, p. 147).

## 2.6 Amount of substance

■ **14th CGPM, 1971, Resolution 3 (CR, 78 and *Metrologia*, 1972, 8, 36): SI unit of amount of substance (mole)\***

The 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering** the advice of the International Union of Pure and Applied Physics, of the International Union of Pure and Applied Chemistry, and of the International Organization for Standardization, concerning the need to define a unit of amount of substance,

**decides**

1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon 12; its symbol is "mol".
2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
3. The mole is a base unit of the Système International d'Unités.

\* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU (1980) specifying that, in this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to.

## 2.7 Luminous intensity

■ **CIPM, 1946, Resolution (PV, 20, 119-122): definitions of photometric units\***

...

4. The photometric units may be defined as follows:

**New candle** (unit of luminous intensity) — The value of the new candle is such that the brightness of the full radiator at the temperature of solidification of platinum is 60 new candles per square centimetre.

\* The two definitions contained in this Resolution were ratified by the 9th CGPM (1948), which also approved the name *candela* given to the "new candle" (CR, 54). For the lumen the qualifier

**New lumen** (unit of luminous flux) — The new lumen is the luminous flux emitted in unit solid angle (steradian) by a uniform point source having a luminous intensity of 1 new candle.

5 . . .

“new” was later abandoned. This definition was modified by the 13th CGPM (1967-1968, Resolution 5, given below).

■ **13th CGPM, 1967-1968, Resolution 5** (CR, 104 and *Metrologia*, 1968, 4, 43-44): **SI unit of luminous intensity (candela)\***

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- the definition of the unit of luminous intensity ratified by the 9th CGPM (1948) and contained in the “Resolution concerning the change of photometric units” adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1946 (PV, 20, 119) in virtue of the powers conferred by the 8th CGPM (1933),
- that this definition fixes satisfactorily the unit of luminous intensity, but that its wording may be open to criticism,

**decides** to express the definition of the candela as follows:

“The candela is the luminous intensity, in the perpendicular direction, of a surface of 1/600 000 square metre of a black body at the temperature of freezing platinum under a pressure of 101 325 newtons per square metre.”

\* This definition was abrogated by the 16th CGPM (1979, Resolution 3, given below).

■ **16th CGPM, 1979, Resolution 3** (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56): **SI unit of luminous intensity (candela)**

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that despite the notable efforts of some laboratories there remain excessive divergences between the results of realizations of the candela based upon the present black body primary standard,
- that radiometric techniques are developing rapidly, allowing precisions that are already equivalent to those of photometry and that these techniques are already in use in national laboratories to realize the candela without having to construct a black body,
- that the relation between luminous quantities of photometry and radiometric quantities, namely the value of 683 lumens per watt for the spectral luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz, has been adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1977,
- that this value has been accepted as being sufficiently accurate for the system of luminous photopic quantities, that it implies a change of only about 3% for the system of luminous scotopic quantities, and that it therefore ensures satisfactory continuity,
- that the time has come to give the candela a definition that will allow an improvement in both the ease of realization and the precision of photometric standards, and that applies to both photopic and scotopic photometric quantities and to quantities yet to be defined in the mesopic field,

**decides**

1. The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency  $540 \times 10^{12}$  hertz and that has a radiant intensity in that direction of  $1/683$  watt per steradian.
2. The definition of the candela (at the time called new candle) adopted by the CIPM in 1946 by reason of the powers conferred by the 8th CGPM in 1933, ratified by the 9th CGPM in 1948, then amended by the 13th CGPM in 1967, is abrogated.

**3 Decisions relating to SI derived and supplementary units****3.1 SI derived units****■ 12th CGPM, 1964, Resolution 7 (CR, 94): curie\***

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures, **considering** that the curie has been used for a long time in many countries as unit of activity for radionuclides, **recognizing** that in the Système International d'Unités (SI), the unit of this activity is the second to the power of minus one ( $s^{-1}$ ), **accepts** that the curie be still retained, outside SI, as unit of activity, with the value  $3.7 \times 10^{10} s^{-1}$ . The symbol for this unit is Ci.

\* The name "becquerel" (Bq) was adopted by the 15th CGPM (1975, Resolution 8, given below) for the SI unit of activity:  
1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq.

**■ 13th CGPM, 1967-1968, Resolution 6 (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44): SI derived units\***

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), **considering** that it is useful to add some derived units to the list of paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960), **decides** to add:

wave number	1 per metre	$m^{-1}$
entropy	joule per kelvin	J/K
specific heat capacity	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m · K)
radiant intensity	watt per steradian	W/sr
activity (of a radioactive source)	1 per second	$s^{-1}$

\* The unit of activity was given a special name and symbol by the 15th CGPM (1975, Resolution 8, given below).

**■ 15th CGPM, 1975, Resolutions 8 and 9 (CR, 105 and *Metrologia*, 1975, 11, 180): SI units for ionizing radiation (becquerel, gray)\***

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures, by reason of the pressing requirement, expressed by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), to extend the use of the Système International d'Unités to radiological research and applications, by reason of the need to make as easy as possible the use of the units for non-specialists, taking into consideration also the grave risks of errors in therapeutic work, **adopts** the following special name for the SI unit of activity: **becquerel**, symbol Bq, equal to one reciprocal second (Resolution 8),

\* At its 1976 meeting, the CIPM approved the report of the 5th meeting of the CCU (1976), specifying that, following the advice of the ICRU, the gray may also be used to express specific energy imparted, kerma and absorbed dose index.

**adopts** the following special name for the SI unit of ionizing radiation:  
**gray**, symbol Gy, equal to one joule per kilogram (Resolution 9).

Note: The gray is the SI unit of absorbed dose. In the field of ionizing radiation the gray may also be used with other physical quantities also expressed in joules per kilogram: the Comité Consultatif des Unités is made responsible for studying this matter in collaboration with the competent international organizations.

■ **16th CGPM, 1979, Resolution 5 (CR, 100 and *Metrologia*, 1980, 16, 56): special name for the SI unit of dose equivalent (sievert)\***

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures,  
**considering**

- the effort made to introduce SI units into the field of ionizing radiations,
- the risk to human beings of an underestimated radiation dose, a risk that could result from a confusion between absorbed dose and dose equivalent,
- that the proliferation of special names represents a danger for the *Système International d'Unités* and must be avoided in every possible way, but that this rule can be broken when it is a matter of safeguarding human health,

**adopts** the special name **sievert**, symbol Sv, for the SI unit of dose equivalent in the field of radioprotection. The sievert is equal to the joule per kilogram.

■ **CIPM, 1984, Recommendation 1 (PV, 52, 31 and *Metrologia*, 1985, 21, 90): concerning the sievert**

The Comité International des Poids et Mesures,

**considering** the confusion which continues to exist on the subject of Resolution 5, approved by the 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (1979),

**decides** to introduce the following explanation in the brochure "*Le Système International d'Unités (SI)*":

The quantity dose equivalent  $H$  is the product of the absorbed dose  $D$  of ionizing radiation and the dimensionless factors  $Q$  (quality factor) and  $N$  (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection:

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

Thus, for a given radiation, the numerical value of  $H$  in joules per kilogram may differ from that of  $D$  in joules per kilogram depending upon the values of  $Q$  and  $N$ . In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose  $D$  and the dose equivalent  $H$ , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose  $D$  and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent  $H$ .

\* The CIPM (1984, Recommendation 1) decided to accompany this Resolution with an explanation, given below.

### 3.2 SI supplementary units

■ **CIPM, 1980, Recommendation 1 (PV, 48, 24 and *Metrologia*, 1981, 17, 72): SI supplementary units (radian and steradian)\***

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

**taking into consideration** Resolution 3 adopted by ISO/TC 12 in 1978 and

\* The class of SI supplementary units was abrogated by decision of the 20th CGPM (1995, Resolution 8 given below).

Recommendation U 1 (1980) adopted by the Comité Consultatif des Unités at its 7th meeting,

**considering**

- that the units radian and steradian are usually introduced into expressions for units when there is need for clarification, especially in photometry where the steradian plays an important role in distinguishing between units corresponding to different quantities,
- that in the equations used one generally expresses plane angle as the ratio of two lengths and solid angle as the ratio between an area and the square of a length, and consequently that these quantities are treated as dimensionless quantities,
- that the study of the formalisms in use in the scientific field shows that none exists which is at the same time coherent and convenient and in which the quantities plane angle and solid angle might be considered as base quantities,

**considering also**

- that the interpretation given by the CIPM in 1969 for the class of supplementary units introduced in Resolution 12 of the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) in 1960 allows the freedom of treating the radian and the steradian as SI base units,
- that such a possibility compromises the internal coherence of the SI based on only seven base units,

**decides to** interpret the class of supplementary units in the International System as a class of dimensionless derived units for which the CGPM allows the freedom of using or not using them in expressions for SI derived units.

■ **20th CGPM, 1995, Resolution 8 (CR, 223 and *Metrologia*, 1996, 33, 83):  
elimination of the class of supplementary units in the SI**

The 20th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),

**considering**

- that the 11th Conférence Générale in 1960 in its Resolution 12, establishing the Système International d'Unités, SI, distinguished between three classes of SI units: the base units, the derived units, and the supplementary units, the last of these comprising the radian and the steradian,
- that the status of the supplementary units in relation to the base units and the derived units gave rise to debate,
- that the Comité International des Poids et Mesures, in 1980, having observed that the ambiguous status of the supplementary units compromises the internal coherence of the SI, has in its Recommendation 1 (CI-1980) interpreted the supplementary units, in the SI, as dimensionless derived units,

**approving** the interpretation given by the Comité International in 1980,

**decides**

- to interpret the supplementary units in the SI, namely the radian and the steradian, as dimensionless derived units, the names and symbols of which may, but need not, be used in expressions for other SI derived units, as is convenient,
- and, consequently, to eliminate the class of supplementary units as a separate class in the SI.



## 4 Decisions concerning terminology and the acceptance of units for use with the SI

### 4.1 SI prefixes

#### ■ 12th CGPM, 1964, Resolution 8 (CR, 94): SI prefixes femto and atto\*

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of prefixes for the formation of names of multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the following two new prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

\* New prefixes were added by the 15th CGPM (1975, Resolution 10, given below).

#### ■ 15th CGPM, 1975, Resolution 10 (CR, 106 and *Metrologia*, 1975, 11, 180-181): SI prefixes peta and exa\*

The 15th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples, which was adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the two following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{15}$	peta	P
$10^{18}$	exa	E

\* New prefixes were added by the 19th CGPM (1991, Resolution 4, given below).

#### ■ 19th CGPM, 1991, Resolution 4 (CR, 185 and *Metrologia*, 1992, 29, 3): SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)

**decides** to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes:

Multiplying factor	Prefix	Symbol
$10^{21}$	zetta	Z
$10^{-21}$	zepto	z
$10^{24}$	yotta	Y
$10^{-24}$	yocto	y

The names zepto and zetta are derived from septo suggesting the number seven (the seventh power of  $10^3$ ) and the letter “z” is substituted for the letter “s” to avoid the duplicate use of the letter “s” as a symbol. The names yocto and yotta are derived from octo, suggesting the number eight (the eighth power of  $10^3$ ); the letter “y” is added to avoid the use of the letter “o” as a symbol because it may be confused with the number zero.

### 4.2 Unit symbols and numbers

#### ■ 9th CGPM, 1948, Resolution 7 (CR, 70): writing and printing of unit symbols and of numbers\*

##### Principles

Roman (upright) type, in general lower case, is used for symbols of units; if, however, the symbols are derived from proper names, capital roman type is used. These symbols are not followed by a full stop.

\* The CGPM abrogated certain decisions on units and terminology,

In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part. Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups.

Unit	Symbol	Unit	Symbol
• metre	m	ampere	A
• square metre	m <sup>2</sup>	volt	V
• cubic metre	m <sup>3</sup>	watt	W
• micron	μ	ohm	Ω
• litre	l	coulomb	C
• gram	g	farad	F
• tonne	t	henry	H
second	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dyne	dyn	newton	N
degree Celsius	°C	• candela (new candle)	cd
• degree absolute	°K	lux	lx
calorie	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hour	h		

in particular: micron, degree absolute and the terms “degree” and “deg”, 13th CGPM (1967-1968, Resolutions 7 and 3, see below and p. 123), and the litre, 16th CGPM (1979, Resolution 6, see p. 131).

#### Notes

1. The symbols whose unit names are preceded by dots are those which had already been adopted by a decision of the CIPM.
2. The symbol for the stère, the unit of volume for firewood, shall be “st” and not “s”, which had been previously assigned to it by the CIPM.
3. To indicate a temperature interval or difference, rather than a temperature, the word “degree” in full, or the abbreviation “deg”, must be used.

### 4.3 Unit names

#### ■ 13th CGPM, 1967-1968, Resolution 7 (CR, 105 and *Metrologia*, 1968, 4, 44): abrogation of earlier decisions (micron, new candle)

The 13th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), **considering** that subsequent decisions of the General Conference concerning the *Système International d’Unités* are incompatible with parts of Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

**decides** accordingly to remove from Resolution 7 of the 9th Conference:

1. the unit name “micron”, and the symbol “μ” which had been given to that unit but which has now become a prefix;
2. the unit name “new candle”.

#### 4.4 Units accepted for use with the SI; an example: the litre

##### ■ 3rd CGPM, 1901 (CR, 38-39): declaration concerning the definition of the litre\*

...

##### The Conference declares

1. The unit of volume, for high accuracy determinations, is the volume occupied by a mass of 1 kilogram of pure water, at its maximum density and at standard atmospheric pressure: this volume is called "litre".
2. ...

\* This definition was abrogated by the 12th CGPM (1964, Resolution 6, given below).

##### ■ 11th CGPM, 1960, Resolution 13 (CR, 88): cubic decimetre and litre

The 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering**

- that the cubic decimetre and the litre are unequal and differ by about 28 parts in  $10^6$ ,
- that determinations of physical quantities which involve measurements of volume are being made more and more accurately, thus increasing the risk of confusion between the cubic decimetre and the litre,

**requests** the Comité International des Poids et Mesures to study the problem and submit its conclusions to the 12th CGPM.

##### ■ CIPM, 1961, Recommendation (PV, 29, 34): cubic decimetre and litre

The Comité International des Poids et Mesures recommends that the results of accurate measurements of volume be expressed in units of the International System and not in litres.

##### ■ 12th CGPM, 1964, Resolution 6 (CR, 93): litre

The 12th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**considering** Resolution 13 adopted by the 11th CGPM in 1960 and the Recommendation adopted by the Comité International des Poids et Mesures in 1961,

1. **abrogates** the definition of the litre given in 1901 by the 3rd CGPM,
2. **declares** that the word "litre" may be employed as a special name for the cubic decimetre,
3. **recommends** that the name litre should not be employed to give the results of high-accuracy volume measurements.

##### ■ 16th CGPM, 1979, Resolution 6 (CR, 101 and *Metrologia*, 1980, 16, 56-57): symbols for the litre

The 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM),  
**recognizing** the general principles adopted for writing the unit symbols in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),  
**considering** that the symbol l for the unit litre was adopted by the Comité

International des Poids et Mesures (CIPM) in 1879 and confirmed in the same Resolution of 1948,

**considering** also that, in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1, several countries have adopted the symbol L instead of l for the unit litre,

**considering** that the name litre, although not included in the Système International d'Unités, must be admitted for general use with the System,

**decides**, as an exception, to adopt the two symbols l and L as symbols to be used for the unit litre,

**considering** further that in the future only one of these two symbols should be retained,

**invites** the CIPM to follow the development of the use of these two symbols and to give the 18th CGPM its opinion as to the possibility of suppressing one of them.

The CIPM, in 1990, considered that it was still too early to choose a single symbol for the litre.

## Appendix 2. Practical realization of the definitions of some important units

This appendix concerns the practical realization of the definitions of some key units of the SI. It lists CGPM and CIPM decisions relevant to current realizations and presents the framework within which standards laboratories must work if units they realize are to be in conformity with those defined by the SI.

### 1 Length

Recommendation 1 (CI-1997) was adopted by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) in 1997 to specify and update the rules for the practical realization of the definition of the metre:

The Comité International des Poids et Mesures,

#### recalling

- that in 1983 the 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) adopted a new definition of the metre;
- that in the same year the CGPM invited the Comité International des Poids et Mesures (CIPM)
  - to draw up instructions for the practical realization of the metre,
  - to choose radiations which can be recommended as standards of wavelength for the interferometric measurement of length and draw up instructions for their use,
  - to pursue studies undertaken to improve these standards and in due course to extend or revise these instructions;
- that in response to this invitation the CIPM adopted Recommendation 1 (CI-1983) (*mise en pratique* of the definition of the metre) to the effect:
  - that the metre should be realized by one of the following methods:
    - a) by means of the length  $l$  of the path travelled in vacuum by a plane electromagnetic wave in a time  $t$ ; this length is obtained from the measured time  $t$ , using the relation  $l = c_0 \cdot t$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - b) by means of the wavelength in vacuum  $\lambda$  of a plane electromagnetic wave of frequency  $f$ ; this wavelength is obtained from the measured frequency  $f$  using the relation  $\lambda = c_0/f$  and the value of the speed of light in vacuum  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s,
    - c) by means of one of the radiations from the list below, whose stated wavelength in vacuum or whose stated frequency can be used with the

Current practice is to use  $c_0$  to denote the speed of light in vacuum (ISO 31). In the original Recommendation of 1983, the symbol  $c$  was used for this purpose.

uncertainty shown, provided that the given specifications and accepted good practice are followed;

- that in all cases any necessary corrections be applied to take account of actual conditions such as diffraction, gravitation or imperfection in the vacuum;

- that the CIPM had recommended a list of radiations for this purpose;

**recalling also** that in 1992 the CIPM revised the practical realization of the definition of the metre;

**considering**

- that science and technology continue to demand improved accuracy in the realization of the metre;
- that since 1992 work in national laboratories, in the BIPM and elsewhere has identified new radiations and methods for their realization which lead to lower uncertainties;
- that such work has also substantially reduced the uncertainty in the determined value of the frequency and wavelength in vacuum of one of the previously recommended radiations;
- that a revision of the list of recommended radiations is desirable for many applications, which include not only the direct realization of the metre by means of optical interferometry for practical length measurement, but also spectroscopy, atomic and molecular physics and the determination of fundamental physical constants;

**recommends**

- that the list of recommended radiations given by the CIPM in 1992 (Recommendation 3 (CI-1992)) be replaced by the list of radiations given below;
- that to the rules for the realization of the metre the following note be added concerning general relativity:

In the context of general relativity, the metre is considered a unit of proper length. Its definition, therefore, applies only within a spatial extent sufficiently small that the effects of the non-uniformity of the gravitational field can be ignored. In this case, the effects to be taken into account are those of special relativity only. The local methods for the realization of the metre recommended in *b*) and *c*) provide the proper metre but not necessarily that given in *a*). Method *a*) should, therefore, be restricted to lengths *l* which are sufficiently short for the effects predicted by general relativity to be negligible with respect to the uncertainties of realization. For advice on the interpretation of measurements in which this is not the case, see the report of the CCDS working group on the application of general relativity to metrology (Application of general relativity to metrology, *Metrologia*, 1997, **34**, 261-290).

## CIPM list of approved radiations for the practical realization of the metre, 1997: frequencies and vacuum wavelengths

This list replaces those published in PV, 1983, **51**, 25-28, 1992, **60**, 141-144 and *Metrologia*, 1984, **19**, 165-166, 1993/94, **30**, 523-541.

In this list, the values of the frequency  $f$  and of the vacuum wavelength  $\lambda$  should be related exactly by the relation  $\lambda f = c_0$ , with  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s, but the values of  $\lambda$  are rounded.

The data and analysis used for the compilation of this list are set out in the associated Appendix: Source Data for the List of Recommended Radiations, 1997 and its Annotated Bibliography.

It should be noted that for several of the listed radiations, few independent values are available, so the estimated uncertainties may not reflect all sources of variability.

Each of the listed radiations can be replaced, without degrading the accuracy, by a radiation corresponding to another component of the same transition or by another radiation, when the frequency difference is known with sufficient accuracy. It should be also noted that to achieve the uncertainties given here it is not sufficient just to meet the specifications for the listed parameters. In addition, it is necessary to follow the best good practice concerning methods of stabilization as described in numerous scientific and technical publications. References to appropriate articles, illustrating accepted good practice for a particular radiation, may be obtained by application to a member laboratory of the CCDM or to the BIPM.

### 1. Recommended radiations of stabilized lasers

#### 1.1 Absorbing atom $^1\text{H}$ , 1S-2S, two-photon transition

The values  $f = 1\,233\,030\,706\,593.7$  kHz

$\lambda = 243\,134\,624.6260$  fm

with a relative standard uncertainty of  $8.5 \times 10^{-13}$  apply to radiation stabilized to the two-photon transition in a cold hydrogen beam, corrected to zero laser power, and for atoms which are effectively stationary, i.e. the values are corrected for second-order Doppler shift.

Other hydrogen absorbing transitions may be similarly used, and are given in Appendix M 3 to the CCDM Report (1997).

#### 1.2 Absorbing molecule $^{127}\text{I}_2$ , transition 43-0, P(13), component $a_3$ (or s)

The values  $f = 582\,490\,603.37$  MHz

$\lambda = 514\,673\,466.4$  fm

with a relative standard uncertainty of  $2.5 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of an  $\text{Ar}^+$  laser stabilized with an iodine cell external to the laser, having a cold-finger temperature of  $(-5 \pm 2)$  °C.

For this Appendix, see the CCDM Report (1997).

At its 1997 meeting, the CIPM changed the name of the Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM) to Comité Consultatif des Longueurs, Consultative Committee for Length (CCL).

For the specification of operating conditions, such as temperature, modulation width and laser power, the symbols  $\pm$  refer to a tolerance, not an uncertainty.

**1.3** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 32-0, R(56), component  $a_{10}$ The values  $f = 563\,260\,223.48$  MHz $\lambda = 532\,245\,036.14$  fm

with a relative standard uncertainty of  $7 \times 10^{-11}$  apply to the radiation of a frequency-doubled Nd:YAG laser, stabilized with an iodine cell external to the laser, having a cold-finger temperature between  $-10$  °C and  $-20$  °C.

Other  $^{127}\text{I}_2$  absorbing transitions close to this transition may also be used by making reference to the following frequency differences, for which the standard uncertainty is  $u_c = 2$  kHz.

Wavelengths for  $^{127}\text{I}_2$  transitions

Transition	Frequency difference
x	$[f(x) - f(32-0, R(56), a_{10})]/\text{kHz}$
32-0, R(57), $a_1$	-50 946 880.4
32-0, P(54), $a_1$	-47 588 892.5
35-0, P(119), $a_1$	-36 840 161.5
33-0, R(86), $a_1$	-32 190 404.0
34-0, R(106), $a_1$	-30 434 761.5
36-0, R(134), $a_1$	-17 173 680.4
33-0, P(83), $a_{21}$	-15 682 074.1
32-0, R(56), $a_{10}$	0
32-0, P(53), $a_1$	+2 599 708.0

Here,  $f(x)$  represents the frequency of the transition denoted x and  $f(32-0, R(56), a_{10})$  the frequency of the reference transition.

**1.4** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 26-0, R(12), component  $a_9$ The values  $f = 551\,579\,482.96$  MHz $\lambda = 543\,516\,333.1$  fm

with a relative standard uncertainty of  $2.5 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a frequency stabilized He-Ne laser with an external iodine cell having a cold-finger temperature of  $(0 \pm 2)$  °C.

**1.5** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 9-2, R(47), component  $a_7$  (or o)The values  $f = 489\,880\,354.9$  MHz $\lambda = 611\,970\,770.0$  fm

with a relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized with an iodine cell, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of  $(-5 \pm 2)$  °C.

**1.6** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 11-5, R(127), component  $a_{13}$  (or i)The values  $f = 473\,612\,214\,705$  kHz $\lambda = 632\,991\,398.22$  fm

with a relative standard uncertainty of  $2.5 \times 10^{-11}$  apply to the radiation of a He-Ne laser with an internal iodine cell, stabilized using the third harmonic detection technique, subject to the conditions:



- cell-wall temperature ( $25 \pm 5$ ) °C;
- cold-finger temperature ( $15 \pm 0.2$ ) °C;
- frequency modulation width, peak to peak ( $6 \pm 0.3$ ) MHz;
- one-way intracavity beam power (i.e., the output power divided by the transmittance of the output mirror) ( $10 \pm 5$ ) mW for an absolute value of the power shift coefficient  $\leq 1.4$  kHz/mW.

These conditions are by themselves insufficient to ensure that the stated standard uncertainty will be achieved. It is also necessary for the optical and electronic control systems to be operating with the appropriate technical performance. The iodine cell may also be operated under relaxed conditions, leading to the larger uncertainty specified in Appendix M 2 of the CCDM Report (1997).

**1.7** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 8-5, P(10), component  $a_9$  (or g)

The values  $f = 468\,218\,332.4$  MHz

$\lambda = 640\,283\,468.7$  fm

with a relative standard uncertainty of  $4.5 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized with an internal iodine cell having a cold-finger temperature of ( $16 \pm 1$ ) °C and a frequency modulation width, peak to peak, of ( $6 \pm 1$ ) MHz.

**1.8** Absorbing atom  $^{40}\text{Ca}$ , transition  $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ ;  $\Delta m_J = 0$

The values  $f = 455\,986\,240\,494.15$  kHz

$\lambda = 657\,459\,439.2917$  fm

with a relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-13}$  apply to the radiation of a laser stabilized to Ca atoms. The values correspond to the mean frequency of the two recoil-split components for atoms which are effectively stationary, i.e. the values are corrected for second-order Doppler shift.

**1.9** Absorbing ion  $^{88}\text{Sr}^+$ , transition  $5\ ^2\text{S}_{1/2} - 4\ ^2\text{D}_{5/2}$

The values  $f = 444\,779\,044.04$  MHz

$\lambda = 674\,025\,590.95$  fm

with a relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-10}$  apply to the radiation of a laser stabilized to the transition observed with a trapped and cooled strontium ion. The values correspond to the centre of the Zeeman multiplet.

**1.10** Absorbing atom  $^{85}\text{Rb}$ ,  $5\text{S}_{1/2} (F = 3) - 5\text{D}_{5/2} (F = 5)$ , two-photon transition

The values  $f = 385\,285\,142\,378$  kHz

$\lambda = 778\,105\,421.22$  fm

with a relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-11}$  apply to the radiation of a laser stabilized to the centre of the two-photon transition. The values apply to a rubidium cell at a temperature below 100 °C, are corrected to zero laser power, and for second-order Doppler shift.

Other rubidium absorbing transitions may also be used, and are given in Appendix M 3 to the CCDM Report (1997).

**1.11** Absorbing molecule  $\text{CH}_4$ , transition  $\nu_3$ , P(7), component  $F_2^{(2)}$

1.11.1 The values  $f = 88\,376\,181\,600.18$  kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397.327$  fm

with a relative standard uncertainty of  $3 \times 10^{-12}$  apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized to the central component [(7-6) transition] of the resolved hyperfine-structure triplet. The values correspond to the mean frequency of the two recoil-split components for molecules which are effectively stationary, i.e. the values are corrected for second-order Doppler shift.

1.11.2 The values  $f = 88\,376\,181\,600.5$  kHz  
 $\lambda = 3\,392\,231\,397.31$  fm

with a relative standard uncertainty of  $2.3 \times 10^{-11}$  apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized to the centre of the unresolved hyperfine-structure of a methane cell, within or external to the laser, held at room temperature and subject to the following conditions:

- methane pressure  $\leq 3$  Pa;
- mean one-way intracavity surface power density (i.e., the output power density divided by the transmittance of the output mirror)  $\leq 10^4$  W m<sup>-2</sup>;
- radius of wavefront curvature  $\geq 1$  m;
- inequality of power between counter-propagating waves  $\leq 5\%$ ;
- servo referenced to a detector placed at the output facing the laser tube.

**1.12** Absorbing molecule OsO<sub>4</sub>, transition in coincidence with the <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O<sub>2</sub>, R(12) laser line

The values  $f = 29\,096\,274\,952.34$  kHz  
 $\lambda = 10\,303\,465\,254.27$  fm

with a relative standard uncertainty of  $6 \times 10^{-12}$  apply to the radiation of a CO<sub>2</sub> laser stabilized with an external OsO<sub>4</sub> cell at a pressure below 0.2 Pa.

Other transitions may also be used, and are given in Appendix M 3 of the CCDM Report (1997).

## 2. Recommended values for radiations of spectral lamps and other sources

**2.1** Radiation corresponding to the transition between the levels 2p<sub>10</sub> and 5d<sub>5</sub> of the atom of <sup>86</sup>Kr

The value  $\lambda = 605\,780\,210.3$  fm

with a relative expanded uncertainty,  $U = ku_c$  ( $k = 3$ ), of  $4 \times 10^{-9}$  [equal to three times the relative standard uncertainty of  $1.3 \times 10^{-9}$ ], applies to the radiation emitted by a discharge lamp operated under the conditions recommended by the CIPM in 1960 (PV, **28**, 71-72 and CR, 1960, 85). These are as follows:

The radiation of <sup>86</sup>Kr is obtained by means of a hot cathode discharge lamp containing <sup>86</sup>Kr, of a purity not less than 99 %, in sufficient quantity to assure the presence of solid krypton at a temperature of 64 K, this lamp having a capillary with the following characteristics: inner diameter from 2 mm to 4 mm, wall thickness about 1 mm.

It is estimated that the wavelength of the radiation emitted by the positive column is equal, to within 1 part in 10<sup>8</sup>, to the wavelength corresponding to the transition between the unperturbed levels, when the following conditions are satisfied:

The uncertainty quoted in the 1960 document was  $1 \times 10^{-8}$  and was subsequently improved to  $4 \times 10^{-9}$  (BIPM Com. Cons. *Déf. du Mètre*, 1973, **5**, M 12).

1. the capillary is observed end-on from the side closest to the anode;
2. the lower part of the lamp, including the capillary, is immersed in a cold bath maintained at a temperature within one degree of the triple point of nitrogen;
3. the current density in the capillary is  $(0.3 \pm 0.1) \text{ A/cm}^2$ .

## 2.2 Radiations for atoms of $^{86}\text{Kr}$ , $^{198}\text{Hg}$ and $^{114}\text{Cd}$

In 1963 the CIPM (*BIPM Com. Cons. Déf. Mètre*, 1962, **3**, 18-19 and PV, **52**, 26-27) specified values for the vacuum wavelengths,  $\lambda$ , operating conditions, and corresponding uncertainties, for certain transitions in  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{198}\text{Hg}$  and  $^{114}\text{Cd}$ .

Vacuum wavelengths,  $\lambda$ , for  $^{86}\text{Kr}$  transitions

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$2p_9 - 5d'_4$	645 807.20
$2p_8 - 5d_4$	642 280.06
$1s_3 - 3p_{10}$	565 112.86
$1s_4 - 3p_8$	450 361.62

For  $^{86}\text{Kr}$ , the above values apply, with a relative uncertainty of  $2 \times 10^{-8}$ , to radiations emitted by a lamp operated under conditions similar to those specified in (2.1).

Vacuum wavelengths,  $\lambda$ , for  $^{198}\text{Hg}$  transitions

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$6^1P_1 - 6^1D_2$	579 226.83
$6^1P_1 - 6^3D_2$	577 119.83
$6^3P_2 - 7^3S_1$	546 227.05
$6^3P_1 - 7^3S_1$	435 956.24

For  $^{198}\text{Hg}$ , the above values apply, with a relative uncertainty of  $5 \times 10^{-8}$ , to radiations emitted by a discharge lamp when the following conditions are met:

- a) the radiations are produced using a discharge lamp without electrodes containing  $^{198}\text{Hg}$ , of a purity not less than 98 %, and argon at a pressure from 0.5 mm Hg to 1.0 mm Hg (66 Pa to 133 Pa);
- b) the internal diameter of the capillary of the lamp is about 5 mm, and the radiation is observed transversely;
- c) the lamp is excited by a high-frequency field at a moderate power and is maintained at a temperature less than 10 °C;
- d) it is preferred that the volume of the lamp be greater than 20 cm<sup>3</sup>.

Vacuum wavelengths,  $\lambda$ , for  $^{114}\text{Cd}$  transitions

Transition	$\lambda/\mu\text{m}$
$5^1P_1 - 5^1D_2$	644 024.80
$5^3P_2 - 6^3S_1$	508 723.79
$5^3P_1 - 6^3S_1$	480 125.21
$5^3P_0 - 6^3S_1$	467 945.81

The uncertainties quoted throughout Section 2.2 are judged to correspond to relative expanded uncertainties  $U = k u_c$  ( $k = 3$ ), equal to three times the relative combined standard uncertainties.

For  $^{114}\text{Cd}$ , the above values apply, with a relative uncertainty of  $7 \times 10^{-8}$ , to radiations emitted by a discharge lamp under the following conditions:

- a) the radiations are generated using a discharge lamp without electrodes, containing  $^{114}\text{Cd}$  of a purity not less than 95%, and argon at a pressure of about 1 mm Hg (133 Pa) at ambient temperature;
- b) the internal diameter of the capillary of the lamp is about 5 mm, and the radiation is observed transversely;
- c) the lamp is excited by a high-frequency field of moderate power and is maintained at a temperature such that the green line is not reversed.

**2.3** Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , transition 17-1, P(62) component  $a_1$ , as recommended by the CIPM in 1992 (*BIPM Com. Cons. Déf. Mètre*, 1992, **8**, M18 and M137, and *Mise en Pratique of the Definition of the Metre* (1992), *Metrologia*, 1993/94, **30**, 523-541).

$$\text{The values } f = 520\,206\,808.4 \text{ MHz}$$

$$\lambda = 576\,294\,760.4 \text{ fm}$$

with a relative standard uncertainty of  $4 \times 10^{-10}$ , apply to the radiation of a dye laser (or frequency-doubled He-Ne laser) stabilized with an iodine cell, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of  $(6 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

## 2 Mass

The unit of mass, the kilogram, is the mass of the international prototype of the kilogram kept at the BIPM. It is a cylinder made of an alloy for which the mass fraction of platinum is 90 % and the mass fraction of iridium is 10 %. The masses of 1 kg secondary standards of the same alloy or of stainless steel are compared with the mass of the international prototype by means of balances with a relative uncertainty approaching 1 part in  $10^9$ .

The mass of the international prototype increases by approximately 1 part in  $10^9$  per year due to the inevitable accumulation of contaminants on its surface. For this reason, the CIPM declared that, pending further research, the reference mass of the international prototype is that immediately after cleaning and washing by a specified method (PV, 1989, **57**, 104-105 and PV, 1990, **58**, 95-97). The reference mass thus defined is used to calibrate national standards of platinum-iridium alloy (*Metrologia*, 1994, **31**, 317-336).

In the case of stainless-steel 1 kg standards, the relative uncertainty of comparisons is limited to about 1 part in  $10^8$  by uncertainty in the correction for air buoyancy. The results of comparisons made in vacuum, though unaffected by air buoyancy, are subject to additional corrections to account for changes in mass of the standards when cycled between vacuum and atmospheric pressure.

Mass standards representing multiples and submultiples of the kilogram can be calibrated by a conceptually simple procedure.

## 3 Time

### 3.1 Unit of time

A small number of national metrology laboratories realize the unit of time with the highest accuracy. To do so, they design and build primary frequency standards that produce electric oscillations at a frequency whose relationship to the transition frequency of the atom of caesium 133, which defines the second, is known. In 1997, the best of these primary standards produces the SI second with a relative combined standard uncertainty of 2 parts in  $10^{15}$ . It is important to note that the definition of the second should be understood as the definition of the unit of proper time: it applies in a small spatial domain which shares the motion of the caesium atom. In a laboratory sufficiently small to allow the effects of the non-uniformity of the gravitational field to be neglected when compared to the uncertainties of the realization of the second, the proper second is obtained after application of the special relativistic correction for the velocity of the atom in the laboratory. It is wrong to correct for the local gravitational field.

Primary frequency standards can also be used for calibration of the frequency of secondary time standards used in national time-service laboratories. These are generally commercial caesium clocks characterized by extreme long-term stability: able to maintain a frequency with a stability better than 1 part in  $10^{14}$  over a few months, they constitute very good “time-keepers”. The relative uncertainty of their frequencies is of the order of  $10^{-12}$ . Time metrology laboratories also use hydrogen masers with good short-term stability. These instruments are used in all applications which require a stable reference over intervals of less than one day (stability of 1 part in  $10^{15}$  at 10 000 s). In their basic form, hydrogen masers are subject to frequency drifts that become apparent when their mean frequencies are compared with that of a caesium clock over a few days. This drift is greatly reduced when the masers are operated in an active mode with a self-servo-controlled cavity. Caesium clocks and hydrogen masers must be operated under carefully controlled environmental conditions.

### 3.2 Clock comparisons, time scales

National laboratories usually operate a number of clocks. These are run independently of one another and their data are combined to generate a perennial time scale. This scale is more stable and more accurate than that of any individual contributing clock. The scale is based on the results of local clock comparisons in the laboratory, and often has an uncertainty of less than 100 ps. These time scales are generally designated  $TA(k)$  for laboratory  $k$ .

The synchronization of clocks operating in widely separated laboratories is an important concern for time metrology. It calls for accurate methods of clock comparison that can be operated everywhere on Earth, at any time. The satellite system of the Global Positioning System (GPS) provides a satisfactory solution to this problem: made up of twenty-four non-geostationary satellites, this system is designed for positioning, but has the particular feature that the satellites are

equipped with caesium clocks which broadcast time signals. These signals are used in the following way. Clocks in two distant laboratories are compared individually with a clock on board a satellite which is visible simultaneously from both laboratories and the difference is calculated. For a comparison extending over ten minutes, the uncertainty thus obtained may be a few nanoseconds, even for clocks which are separated by several thousand kilometres. To reduce these uncertainties to this limit the data must be considered very carefully: results obtained from views that are not strictly simultaneous must be systematically rejected and a correction must be applied to take account of the exact position of the satellite, data known only a few days later.

The GPS is used on a regular basis to link national laboratories in many countries and it will shortly be complemented by a similar Russian system: the Global Navigation Satellite System (GLONASS). Among other methods under study are bidirectional techniques based on the transmission of an optical or radiofrequency signal from one laboratory to another and back, via a satellite. Such methods should lead to subnanosecond accuracy before the end of the century. All these methods of time comparison are subject to relativistic effects which may exceed 100 ns, so corrections must be applied to take them into account.

Optimal combination of all the results of comparisons between the clocks maintained in the national time-service laboratories results in a world reference time scale, International Atomic Time (TAI), approved by the 14th CGPM in 1971 (Resolution 1; CR, 77 and *Metrologia*, 1972, **8**, 35). The first definition of TAI was that submitted by the then CCDS in 1970 to the CIPM (Recommendation S 2; PV, **38**, 110 and *Metrologia*, 1971, **7**, 43):

International Atomic Time (TAI) is the time reference coordinate established by the Bureau International de l'Heure on the basis of the readings of atomic clocks operating in various establishments in accordance with the definition of the second, the unit of time of the International System of Units.

In the framework of general relativity TAI must be regarded as a time coordinate (or *coordinate time*): its definition was therefore completed as follows (declaration of the CCDS, *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 1980, **9**, S15 and *Metrologia*, 1981, **17**, 70):

TAI is a coordinate time scale defined in a geocentric reference frame with the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit.

This definition was amplified by the International Astronomical Union in 1991, Resolution A4:

TAI is a realized time scale whose ideal form, neglecting a constant offset of 32.184 s, is Terrestrial Time (TT), itself related to the time coordinate of the geocentric reference frame, Geocentric Coordinate Time (TCG), by a constant rate.

For details see the proceedings of the 21st General Assembly of the IAU, Buenos Aires, *IAU Trans.* 1991, vol. **XXIB** (Kluwer).

Responsibility for TAI was accepted by the CIPM from the Bureau International de l'Heure on 1 January 1988. TAI is processed in two steps. A weighted average based on some 200 clocks maintained under metrological conditions in about fifty laboratories is first calculated. The algorithm used is optimized for long-term stability, which requires observation of the behaviour of clocks over a long duration. In consequence, TAI is a deferred-time time scale, available with a delay of a few weeks. In 1997, the relative frequency stability of TAI was estimated to be 2 parts in  $10^{15}$  for mean durations of two months. The frequency accuracy of TAI is evaluated by comparing the TAI scale unit with various realizations of the SI second of primary frequency standards. This requires the application of a correction to compensate for the relativistic frequency shift between the location of the primary standard and a point fixed on the rotating geoid. The magnitude of this correction is, between points fixed on the surface of the Earth, of the order of 1 part in  $10^{16}$  per metre of altitude. In 1997, the difference between the TAI scale unit and the SI second on the rotating geoid was  $+2 \times 10^{-14}$  s, and was known with an uncertainty of  $5 \times 10^{-15}$  s. This difference is reduced by steering the frequency of TAI by the application of corrections, of magnitude 1 part in  $10^{15}$ , every two months. This method improves the accuracy of TAI while not degrading its middle-term stability.

### 3.3 Legal time

TAI is not distributed directly in every-day life. The time in common use (broadcast by radio, television, the telephone...) is referred to a time scale called Coordinated Universal Time (UTC) as recommended by the 15th CGPM in its Resolution 5 in 1975 (CR, 104 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180). UTC differs from TAI by a whole number of seconds, equal to  $-31$  s on 1 July 1997. This difference can be modified in steps of 1 s, using a positive or negative leap second, in order to keep UTC in agreement with the time defined by the rotation of the Earth such that, when averaged over a year, the Sun crosses the Greenwich meridian at noon UTC to within 0.9 s. In addition, the legal time of most countries is offset from UTC by a whole number of hours (time zones and “summer time”). National time-service laboratories maintain an approximation of UTC known as  $UTC(k)$  for laboratory  $k$ . The differences between  $UTC(k)$  and UTC are in general no more than a few hundreds of nanoseconds.

## 4 Electrical quantities

The realization to high accuracy of the ampere (a base unit of the SI), the ohm and the volt (derived units of the SI) directly in terms of their definitions is difficult and time consuming. The best such realizations of the ampere are now obtained through combinations of realizations of the watt, the ohm and the volt. The watt realized electrically is compared by beam-balance experiments with the watt realized mechanically. These experiments employ a coil in a magnetic flux and are devised in such a way that it is not necessary to know either the dimensions of the coil or the magnitude of the flux density. The ohm is realized using a Thompson-Lampard capacitor whose value can be changed by an amount

that depends only on the magnitude of a linear displacement of a guard electrode. The volt is realized by means of a balance in which an electrostatic force is measured in terms of a mechanical force. The ampere may thus be deduced from combinations of any two of these units. The relative uncertainty in the value of the ampere obtained in this way is estimated to be a few parts in  $10^7$ . The ampere, ohm and volt may also be determined from measurements of various combinations of physical constants. Laboratory reference standards for the volt and the ohm based upon the Josephson and quantum-Hall effects are, however, significantly more reproducible and stable than a few parts in  $10^7$ . In order to take advantage of these highly stable methods of maintaining laboratory reference standards of the electrical units while at the same time taking care not to change their SI definitions, the 18th CGPM in 1987 adopted Resolution 6 which calls for representations of the volt and the ohm to be based on conventional values for the Josephson constant  $K_J$  and the von Klitzing constant  $R_K$ .

■ **18th CGPM, 1987, Resolution 6** (CR, 100 and *Metrologia*, 1988, 25, 115):  
**forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm**

The 18th Conférence Générale des Poids et Mesures,  
**considering**

- that world-wide uniformity and long-term stability of national representations of the electrical units are of major importance for science, commerce and industry from both the technical and economic points of view,
- that many national laboratories use the Josephson effect and are beginning to use the quantum Hall effect to maintain, respectively, representations of the volt and of the ohm, as these offer the best guarantees of long-term stability,
- that because of the importance of coherence among the units of measurement of the various physical quantities the values adopted for these representations must be as closely as possible in agreement with the SI,
- that the results of recent and current experiment will permit the establishment of an acceptable value, sufficiently compatible with the SI, for the coefficient which relates each of these effects to the corresponding electrical unit,

**invites** the laboratories whose work can contribute to the establishment of the quotient voltage/frequency in the case of the Josephson effect and of the quotient voltage/current for the quantum Hall effect to vigorously pursue these efforts and to communicate their results without delay to the Comité International des Poids et Mesures, and

**instructs** the Comité International des Poids et Mesures to recommend, as soon as it considers it possible, a value for each of these quotients together with a date for them to be put into practice simultaneously in all countries; these values should be announced at least one year in advance and would be adopted on 1 January 1990.

In 1988 the CIPM adopted Recommendations 1 (CI-1988) and 2 (CI-1988) which set exact values for the Josephson and von Klitzing constants, and called for laboratories to base their standards on these values from 1 January 1990.



■ **CIPM, 1988, Recommendation 1** (PV, 56, 44 and *Metrologia*, 1989, 26, 69):  
**representation of the volt by means of the Josephson effect**

The Comité International des Poids et Mesures

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

**considering**

- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of 483 597.9 GHz/V for the Josephson constant,  $K_J$ , that is to say, for the quotient of frequency divided by the potential difference corresponding to the  $n = 1$  step in the Josephson effect,
- that the Josephson effect, together with this value of  $K_J$ , can be used to establish a reference standard of electromotive force having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the volt estimated to be 4 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that 483 597.9 GHz/V exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $K_{J-90}$  for the Josephson constant,  $K_J$ ,
- that this new value be used from 1 January 1990, and not before, to replace the values currently in use,
- that this new value be used from this same date by all laboratories which base their measurements of electromotive force on the Josephson effect, and
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with the new adopted value,

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the Josephson constant will be necessary in the foreseeable future, and

**draws the attention** of laboratories to the fact that the new value is greater by 3.9 GHz/V, or about 8 parts in  $10^6$ , than the value given in 1972 by the Comité Consultatif d'Électricité in its Declaration E-72.

■ **CIPM, 1988, Recommendation 2** (PV, 56, 45 and *Metrologia*, 1989, 26, 70):  
**representation of the ohm by means of the quantum Hall effect**

The Comité International des Poids et Mesures,

**acting** in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

**considering**

- that most existing laboratory reference standards of resistance change significantly with time,
- that a laboratory reference standard of resistance based on the quantum Hall effect would be stable and reproducible,
- that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of 25 812.807  $\Omega$  for the von Klitzing constant,  $R_K$ , that is to say, for the quotient of the Hall potential difference divided by current corresponding to the plateau  $i = 1$  in the quantum Hall effect,

- that the quantum Hall effect, together with this value of  $R_K$ , can be used to establish a reference standard of resistance having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the ohm estimated to be 2 parts in  $10^7$ , and a reproducibility which is significantly better,

**recommends**

- that 25 812.807  $\Omega$  exactly be adopted as a conventional value, denoted by  $R_{K-90}$ , for the von Klitzing constant,  $R_K$ ,
- that this value be used from 1 January 1990, and not before, by all laboratories which base their measurements of resistance on the quantum Hall effect,
- that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with  $R_{K-90}$ ,
- that in the use of the quantum Hall effect to establish a laboratory reference standard of resistance, laboratories follow the most recent edition of the technical guidelines for reliable measurements of the quantized Hall resistance drawn up by the Comité Consultatif d'Électricité and published by the Bureau International des Poids et Mesures, and

**is of the opinion** that no change in this recommended value of the von Klitzing constant will be necessary in the foreseeable future.

At its meeting in 1988 the CCE carefully considered the way in which the recommended conventional values  $K_{J-90}$  and  $R_{K-90}$  should be used and made additional statements to clarify the implications of the Recommendations. These statements may be summarized as follows:

1. Recommendations 1 (CI-1988) and 2 (CI-1988) do not constitute a redefinition of SI units. The conventional values  $K_{J-90}$  and  $R_{K-90}$  cannot be used as bases for defining the volt and the ohm (meaning the present units of electromotive force and electrical resistance in the *Système International d'Unités* (SI)). To do so would change the status of  $\mu_0$  from that of a constant having an exactly defined value (and would therefore abrogate the definition of the ampere) and would also produce electrical units which would be incompatible with the definition of the kilogram and units derived from it.
2. Concerning the use of subscripts on symbols for quantities or units, the CCE considers that symbols for electromotive force (electric potential, electric potential difference) and electric resistance, and for the volt and the ohm, should not be modified by adding subscripts to denote particular laboratories or dates.

These statements were subsequently endorsed by the CIPM. The 19th CGPM (1991, Resolution 2) recommended the continuation of research into the basic theory of the Josephson and the quantum-Hall effects.

## 5 Temperature

Direct measurements of thermodynamic temperature can only be made by using one of a small number of so-called primary thermometers. These are thermometers whose equation of state can be written down explicitly without having to introduce unknown temperature-dependent constants. Primary thermometers

that have been used to provide accurate values of thermodynamic temperature include the constant-volume gas thermometer, the acoustic gas thermometer, the spectral and total radiation thermometers and the electronic noise thermometer. Uncertainties of a few millikelvins have been achieved with such thermometers up to about 373 K, beyond which the uncertainties increase progressively. The use of such thermometers to high accuracy is difficult and time-consuming and there exist secondary thermometers, such as the platinum resistance thermometer, whose reproducibility can be better by a factor of ten than that of any primary thermometer. In order to allow the maximum advantage to be taken of these secondary thermometers the CGPM has, in the course of time, adopted successive versions of an international temperature scale. The first of these was the International Temperature Scale of 1927 (ITS-27); this was replaced by the International Practical Temperature Scale of 1948 (IPTS-48) which in turn was replaced by the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68). In 1976 the CIPM adopted, for use at low temperatures, the 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76). On 1 January 1990 the IPTS-68 and the EPT-76 were replaced by the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the CIPM in 1989 in its Recommendation 5 (CI-1989). The 19th CGPM (1991, Resolution 3) recommended that national laboratories continue their efforts to improve the worldwide uniformity and long-term stability of temperature measurements by rapid implementation of the ITS-90.

■ **CIPM, 1989, Recommendation 5** (PV, 57, 115 and *Metrologia*, 1990, 27, 13): **the International Temperature Scale of 1990**

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) acting in accordance with Resolution 7 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987) has adopted the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) to supersede the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68).

The CIPM **notes** that, by comparison with the IPTS-68, the ITS-90

- extends to lower temperatures, down to 0.65 K, and hence also supersedes the EPT-76,
- is in substantially better agreement with corresponding thermodynamic temperatures,
- has much improved continuity, precision and reproducibility throughout its range and
- has subranges and alternative definitions in certain ranges which greatly facilitate its use.

The CIPM also **notes** that, to accompany the text of the ITS-90 there will be two further documents, the *Supplementary Information for the ITS-90* and *Techniques for Approximating the ITS-90*. These documents will be published by the BIPM and periodically updated.

The CIPM **recommends**

- that on 1 January 1990 the ITS-90 come into force and
- that from this same date the IPTS-68 and the EPT-76 be abrogated.

The ITS-90 extends upwards from 0.65 K to the highest temperature measurable using an optical pyrometer. The scale is based on 1) a set of defining fixed points and 2) specified methods of interpolating between them. The defining fixed points are the temperatures assigned by agreement to a number of experimentally realizable thermodynamic states and the interpolations are defined in terms of the helium vapour-pressure equations from 0.65 K to 5 K, interpolating constant-volume gas thermometers from 3 K to 24.5561 K, platinum resistance thermometers from 13.8033 K to 961.78 °C and the Planck radiation law at higher temperatures. In several ranges of temperature more than one definition of  $T_{90}$ , the temperature defined by the Scale, exists. The various definitions have equal validity.

Advice on the realization and implementation of the ITS-90 is given in two documents, *Supplementary Information for the ITS-90* and *Techniques for Approximating the ITS-90*, which are approved and updated periodically by the CCT and published by the BIPM.

## 6 Amount of substance

All quantitative results of chemical analyses or of dosages can be expressed in units of amount of substance of the elementary entities, for which the base unit is the mole. The principle of physical measurement based on this unit is explained below.

The simplest case is that of a sample of a pure substance that is considered to be formed of atoms; call X the chemical symbol of these atoms. A mole of atoms X contains by definition as many atoms as there are  $^{12}\text{C}$  atoms in 0.012 kg of carbon 12. As neither the mass  $m(^{12}\text{C})$  of an atom of carbon 12 nor the mass  $m(\text{X})$  of an atom X can be measured accurately, we use the ratio of these masses,  $m(\text{X})/m(^{12}\text{C})$ , which can be determined accurately, for example by means of a Penning trap. The mass corresponding to 1 mol of X is then  $[m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0.012$  kg, which is expressed by the statement that the molar mass  $M(\text{X})$  of X (quotient of mass by amount of substance) is

$$M(\text{X}) = [m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0.012 \text{ kg/mol.}$$

For example, the atom of fluorine  $^{19}\text{F}$  and the atom of carbon  $^{12}\text{C}$  have masses which are in the approximate ratio 18.9984/12. The molar mass of the molecular gas  $\text{F}_2$  is:

$$M(\text{F}_2) = \frac{2 \times 18.9984}{12} \times 0.012 \text{ kg/mol} = 0.037\,996\,8 \text{ kg/mol,}$$

and the amount of substance corresponding to a given mass, for example 0.0500 kg of  $\text{F}_2$  is:

$$\frac{0.0500 \text{ kg}}{0.037\,996\,8 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = 1.316 \text{ mol.}$$

In the case of a pure substance that is supposed made up of molecules B, which are combinations of atoms X, Y, ... according to the chemical formula  $B = X_\alpha Y_\beta \dots$ , the mass of one molecule is  $m(B) = \alpha m(X) + \beta m(Y) + \dots$ . This mass is not known precisely but the ratio  $m(B)/m(^{12}\text{C})$  can be determined accurately. The molar mass of a molecular substance B is then:

$$M(B) = \frac{m(B)}{m(^{12}\text{C})} \times 0.012 \text{ kg/mol} = \left( \alpha \frac{m(X)}{m(^{12}\text{C})} + \beta \frac{m(Y)}{m(^{12}\text{C})} + \dots \right) \times 0.012 \text{ kg/mol}.$$

The same procedure is used in the more general case when the composition of substance B is specified as  $X_\alpha Y_\beta$  even if  $\alpha, \beta \dots$  are not integers. If we denote the mass ratios  $m(X)/m(^{12}\text{C}), m(Y)/m(^{12}\text{C}), \dots$  by  $r(X), r(Y), \dots$ , the molar mass of substance B is given by the formula:

$$M(B) = [\alpha r(X) + \beta r(Y) + \dots] \times 0.012 \text{ kg/mol}.$$

Other methods for the measurement of amount of substance are based on the laws of physics and physical chemistry. Three examples are:

1. With perfect gases, 1 mol of particles of any gas occupies the same volume at a temperature  $T$  and a pressure  $p$  (approximately  $0.0224 \text{ m}^3$  at  $T = 273.15 \text{ K}$  and  $p = 101\,325 \text{ Pa}$ ); this provides a method of measuring the ratio of amounts of substance for any two gases (the corrections to apply if the gases are not perfect are well known).
2. For quantitative electrolytic reactions the ratio of amounts of substance can be obtained by measuring quantities of electricity. For example, 1 mol of Ag and (1/2) mol of Cu are deposited on a cathode by the same quantity of electricity (approximately 96 485 C).
3. Application of the laws of extremely dilute solutions is yet another method of determining ratios of amounts of substance.

## 7 Photometric quantities

The definition of the candela given on page 98 is expressed in strictly physical terms. The objective of photometry, however, is to measure light in such a way that the result of the measurement correlates closely with the visual sensation experienced by a human observer of the same radiation. For this purpose, the International Commission on Illumination (CIE) introduced two special functions  $V(\lambda)$  and  $V'(\lambda)$ , referred to as spectral luminous efficiency functions, which describe, respectively, the relative spectral responsivity of the average human eye for photopic (light adapted) and scotopic (dark adapted) vision. The more important of these two, the light-adapted function  $V(\lambda)$ , is expressed relative to its value for the monochromatic radiation to which the eye is most sensitive when adapted to high levels of illuminance. That is, it is defined relative to radiation at  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  which corresponds to a wavelength of 555.016 nm in standard air.

The CIPM has approved the use of these functions with the effect that the corresponding photometric quantities are defined in purely physical terms as

Principles governing photometry, *Monographie BIPM*, 1983, 31 p.

quantities proportional to the integral of a spectral power distribution, weighted according to a specified function of wavelength.

Since the inception of the SI, the candela has been one of its base units: it remained a base unit even after being linked, in 1979, to the derived SI unit of power, the watt. The original photometric standards were light sources, the earliest ones being candles, hence the name candela as the name of the photometric base unit. From 1948 to 1979 the radiation from a black body, Planck radiation, at the temperature of freezing platinum was used to define the candela. Today the definition is given in terms of monochromatic radiation rather than the broadband radiation implied by the black body definition. The value  $1/683$  watt per steradian which appears in the present definition was chosen in 1979 so as to minimize any change in the mean representations of the photometric units maintained by the national standards laboratories.

The definition gives no indication as to how the candela should be realized, which has the great advantage that new techniques to realize the candela can be adopted without changing the definition of the base unit. Today, national metrology institutes realize the candela by radiometric methods. Standard lamps are still used, however, to maintain the photometric units: they provide either a known luminous intensity in a given direction, or a known luminous flux.

## Index

**A**

absorbed dose (see gray)  
 acceleration due to gravity, standard  
 value of ( $g_n$ ), **118**  
 amount of substance, 97, 124, 148-149  
 ampere, 95-**96**, 121-122  
 are, 106  
 atmosphere, standard, **123**  
 atomic mass unit, unified, 106

**B**

becquerel, 100, 126  
 Bureau International des Poids et  
 Mesures (BIPM), 83

**C**

candela, 97-**98**, 125-126  
 candle, new, **124**, 130  
 coherent system of units, 91, 104, 114  
 Comité International des Poids et  
 Mesures (CIPM), 83  
 Consultative Committees, 84-85  
 Conférence Générale des Poids et  
 Mesures (CGPM), 83  
 Convention du Mètre, 83  
 coulomb, **122**  
 cubic decimetre, 131  
 curie, 108, 126

**D**

day, 105  
 definitions of units, practical  
 realization of the, 133-150  
 degree Celsius, 96, 123, 124  
 dimensionless quantities, 102  
 dose equivalent (see sievert)

**E**

electric current (see ampere)  
 electrical quantities, 143-146  
 electronvolt, 106

**F**

farad, 114, **122**  
 force, 96, 100  
 frequency standard, 119, 141

**G**

$g_n$ , **118**  
 gray, 100, 102, 127

**H**

Hall effect, quantum, 144-146  
 hectare, 106  
 henry, 100, 114, **122**, 130  
 hertz, 100, 102, 114, 130  
 hour, 105

**I**

International system of units,  
 SI, 112-115

**J**

jansky, 108  
 joule, 100, 114, **121**, 122-123  
 Josephson effect, 144-145

**K**

kelvin, **96**, 123-124  
 kilogram, **95**, 103, 115, 118, 140  
 kilogram, multiples of, 103, 118

**L**

legislation on units, 93  
 length, 94, 115-117, 133-140  
 litre, 105, 131-132;  
 symbols, 131-132  
 logarithmic quantities  
 (neper, bel), 105  
 lumen, 100, 114, 130; new, 125  
 luminous intensity, 97-98,  
 124-126  
 lux, 100, 114, 130

**M**

mass, 95, 118, 140  
 mass and weight, 118  
 metre, **94**, 115-117, 133-140  
 metric ton, 105, 130  
 Metrologia, 85  
 micron, 108, 130  
 minute, 105  
 mole, **97**, 124, 148-149

Numbers in boldface  
 indicate the pages  
 where the definitions  
 of the units are to be  
 found.

**N**

newton, 96, 100, 114, 121  
numbers, writing and printing,  
129-130

**O**

ohm, 100, 114, **122**, 144-146

**P**

pascal, 100, 122  
photometric quantities, 149-150  
prefixes, SI, 92, 103, 113, 129  
prefixes, SI rules for use of, 110

**Q**

quantities, system of, 93  
quantity of heat, unit of (see joule)  
quantum Hall effect, 144-146

**R**

radian, 100, 113, 127-128  
realization, practical, of the definitions  
of some important units, 133-150

**S**

second, **95**, 118-120  
SI units, multiples and submultiples,  
92, 103, 129  
siemens, 122  
sievert, 100, 102, 127  
speed of light (recommended  
value), 116  
standard atmosphere, **123**  
steradian, 100, 113, 127-128  
substance, amount of, 97, 124,  
148-149  
symbols, for base units, 98  
symbols, for derived units with  
special names, 100  
symbols, for the litre, 105, 131-132  
symbols, writing and use of, 109-110  
system of quantities, 93  
system of units, international (SI),  
112-115  
system of units, proposal for  
establishing a practical, 111-112

**T**

TAI, 120-121, 142-143  
temperature, 122-124, 146-148  
temperature, Celsius, 96, 123  
temperature, thermodynamic, 96,  
123-124  
tesla, 100, 114  
thermodynamic scale, 122-123  
time, 95, 118-121, 141-143  
time, coordinated universal (UTC),  
121, 143  
time, international atomic (TAI),  
120-121, 142-143  
tonne, 105, 130  
triple point of water, 96, 122

**U**

unit of force, 96, 100  
unit of quantity of heat (see joule)  
units, CGS, with special names, 107  
units, electric, 121-122  
units, generally deprecated, 108  
units, in use temporarily, 106  
units, in use with SI, 104-106  
units, legislation on, 93  
units, photometric, 124-126  
units, SI base, 94-98, 115-126;  
symbols, 98  
units, SI derived, 98-102, 126-127  
units, SI derived, with special  
names, 100  
units, SI multiples and submultiples  
of, 92, 103, 129  
units, SI supplementary, 127-128  
units, SI, the two classes of, 92  
UTC, 121, 143

**V**

volt, 100, 114, **122**, 130, 144-145

**W**

watt, 100, 114, **121**, 130  
weber, 100, 114, **122**  
weight (see mass)



# Le Système international d'unités (SI) The International System of Units



**Supplément 2000 :**  
additions et corrections  
à la 7<sup>e</sup> édition (1998)

**Supplement 2000:**  
addenda and corrigenda  
to the 7th edition (1998)

---

**Organisation  
intergouvernementale  
de la Convention  
du Mètre**

# Le Système international d'unités

Supplément 2000 :  
additions et corrections à la 7<sup>e</sup> édition (1998)

page 18

## 2.1.1.3 Unité de temps (seconde)

La note relative à la définition de la seconde est explicitée de la manière suivante :

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

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

Le CCTF a déclaré, lors de sa session de 1999, que l'intention de cette note est de préciser que la définition de la seconde du SI est fondée sur un atome de césium non perturbé par le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire placé dans un environnement à la température de 0 K, et que la fréquence des étalons primaires de fréquence doit donc être corrigée pour tenir compte du décalage dû au rayonnement ambiant.

pages 22-25

Suite à l'adoption du katal par la 21<sup>e</sup> Conférence générale en octobre 1999, les sections suivantes de la brochure sur le SI ont été modifiées comme suit.

## 2.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers ; unités utilisant des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Par souci de commodité, certaines unités dérivées, qui sont mentionnées au tableau 3, ont reçu un nom spécial et un symbole particulier. Ces noms et symboles peuvent eux-mêmes être utilisés pour exprimer d'autres unités dérivées : quelques exemples figurent au tableau 4. Les noms spéciaux et les symboles particuliers permettent d'exprimer, sous une forme condensée, des unités fréquemment utilisées.

Les quatre derniers noms et symboles d'unités figurant au bas du tableau 3 sont particuliers : ils furent spécifiquement approuvés par la 15<sup>e</sup> CGPM (1975, Résolutions 8 et 9 ; CR, 105 et *Metrologia*, 1975, 11, 180), la 16<sup>e</sup> CGPM (1979, Résolution 5 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, 16, 56) et la 21<sup>e</sup> CGPM (1999, Résolution 12, CR) pour la sauvegarde de la santé humaine.

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

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

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

<sup>(a)</sup> Le radian et le stéradian peuvent être utiles, dans les expressions des unités dérivées, pour distinguer des grandeurs de nature différente ayant la même dimension. Des exemples de leur utilisation pour former des noms d'unités dérivées sont mentionnés au tableau 4.

<sup>(b)</sup> En pratique, on emploie les symboles rad et sr lorsque c'est utile, mais l'unité dérivée « 1 » n'est habituellement pas mentionnée.

<sup>(c)</sup> En photométrie, on maintient généralement le nom et le symbole du stéradian, sr, dans l'expression des unités.

<sup>(d)</sup> Cette unité peut être utilisée en association avec des préfixes SI, comme par exemple pour exprimer le sous-multiple millidegré Celsius, m°C.

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

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

Une même unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes, comme on l'a mentionné au paragraphe 1.2 (p. 14). Dans le tableau ci-dessus, où l'énumération des grandeurs citées n'est pas limitative, on en trouve plusieurs exemples. Ainsi joule par kelvin (J/K) est le nom de l'unité SI pour la grandeur capacité thermique aussi bien que pour la grandeur entropie ; de même ampère (A) est le nom de l'unité SI pour la grandeur de base courant électrique aussi bien que pour la grandeur dérivée force magnétomotrice. Il ne suffit donc pas d'indiquer le nom de l'unité pour faire connaître la grandeur mesurée : cette règle s'applique non seulement aux textes scientifiques et techniques mais aussi, par exemple, aux appareils de mesure (c'est-à-dire qu'ils doivent porter non seulement l'indication de l'unité mais aussi l'indication de la grandeur mesurée).

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

En pratique, afin de réduire le risque de confusion entre des grandeurs ayant la même dimension, on exprime leur unité en employant de préférence un nom spécial ou une combinaison particulière d'unités. Par exemple, on appelle l'unité SI de fréquence hertz, plutôt que seconde à la puissance moins un et l'unité SI de vitesse angulaire radian par seconde plutôt que seconde à la puissance moins un (dans ce cas l'usage du nom radian souligne le fait que la vitesse angulaire est égale à  $2\pi$  la fréquence de rotation). De même, on appelle l'unité SI de moment d'une force newton mètre, plutôt que joule.

Dans le domaine des rayonnements ionisants, on appelle l'unité SI d'activité becquerel, plutôt que seconde à la puissance moins un, et on appelle l'unité SI de dose absorbée et l'unité SI d'équivalent de dose, respectivement, gray et sievert, plutôt que joule par kilogramme\*. Dans le domaine de la catalyse, on appelle katal, plutôt que mole par seconde, l'unité SI d'activité catalytique. Les noms spéciaux becquerel, gray, sievert et katal ont été spécifiquement introduits en raison des dangers pour la santé humaine qui pourraient résulter d'erreurs dans l'usage des unités seconde à la puissance moins un, joule par kilogramme et mole par seconde.

## Ajouter à la fin de la section 3.1 page 52

### 3.1 Unités SI dérivées

#### ■ 21<sup>e</sup> CGPM, 1999, Résolution 12 : Nom spécial donné à l'unité SI mole par seconde, le katal, pour exprimer l'activité catalytique

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 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.

---

\* Le Comité international, reconnaissant l'importance particulière des unités relatives à la santé humaine, avait approuvé un texte explicatif sur le sievert lors de la rédaction de la 5<sup>e</sup> édition de cette brochure : voir p. 52, Recommandation 1 (CI-1984) du Comité international (PV, 1984, 52, 31 et *Metrologia*, 1985, 21, 90).



# The International System of Units

Supplement 2000:  
addenda and corrigenda to the 7th edition (1998)

page 95

## 2.1.1.3 Unit of time (second)

The note referring to the definition of the second should read as follows:

At its 1997 meeting, the CIPM affirmed that:

This definition refers to a caesium atom at rest at a temperature of 0 K.

This note was intended to make it clear that the definition of the SI second is based on a Cs atom unperturbed by black-body radiation, that is, in an environment whose temperature is 0 K, and that the frequencies of primary frequency standards should therefore be corrected for the shift due to ambient radiation, as stated at the meeting of the CCTF in 1999.

pages 99-102

To take into account the adoption of the katal by the 21st General Conference at its meeting in October 1999, the following sections of the SI Brochure have been modified as follows.

## 2.2.2 Units with special names and symbols; units which incorporate units with special names and symbols

For convenience, certain derived units, which are listed in Table 3, have been given special names and symbols. These names and symbols may themselves be used to express other derived units: Table 4 shows some examples. The special names and symbols are a compact form for the expression of units which are used frequently.

Among these names and symbols, the last four entries in Table 3 are of particular note since they were accepted by the 15th CGPM (1975, Resolutions 8 and 9; CR, 105 and *Metrologia*, 1975, **11**, 180), the 16th CGPM (1979, Resolution 5; CR, 100 and *Metrologia*, 1980, **16**, 56) and the 21st CGPM (1999, Resolution 12; CR) specifically with a view to safeguarding human health.

In Tables 3 and 4, the final column shows how the SI units concerned may be expressed in terms of SI base units. In this column, factors such as  $\text{m}^0$ ,  $\text{kg}^0$  ..., which are all equal to 1, are not shown explicitly.

**Table 3. SI derived units with special names and symbols**

Derived quantity	SI derived unit			
	Name	Symbol	Expressed in terms of other SI units	Expressed in terms of SI base units
plane angle	radian <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
solid angle	steradian <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
frequency	hertz	Hz		$s^{-1}$
force	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pressure, stress	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energy, work, quantity of heat	joule	J	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
power, radiant flux	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
electric charge, quantity of electricity	coulomb	C		$s \cdot A$
electric potential difference, electromotive force	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacitance	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
electric resistance	ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
electric conductance	siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
magnetic flux	weber	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetic flux density	tesla	T	Wb/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Celsius temperature	degree Celsius <sup>(d)</sup>	°C		K
luminous flux	lumen	lm	cd · sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
illuminance	lux	lx	lm/m <sup>2</sup>	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
activity (referred to a radionuclide)	becquerel	Bq		$s^{-1}$
absorbed dose, specific energy (imparted), kerma	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
dose equivalent, ambient dose equivalent, directional dose equivalent, personal dose equivalent, organ equivalent dose	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
catalytic activity	katal	kat		$s^{-1} \cdot mol$

<sup>(a)</sup> The radian and steradian may be used with advantage in expressions for derived units to distinguish between quantities of different nature but the same dimension. Some examples of their use in forming derived units are given in Table 4.

<sup>(b)</sup> In practice, the symbols rad and sr are used where appropriate, but the derived unit “1” is generally omitted in combination with a numerical value.

<sup>(c)</sup> In photometry, the name steradian and the symbol sr are usually retained in expressions for units.

<sup>(d)</sup> This unit may be used in combination with SI prefixes, e.g. millidegree Celsius, m°C.



**Table 4. Examples of SI derived units whose names and symbols include SI derived units with special names and symbols**

Derived quantity	SI derived unit		
	Name	Symbol	Expressed in terms of SI base units
dynamic viscosity	pascal second	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
moment of force	newton metre	N · m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
surface tension	newton per metre	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
angular velocity	radian per second	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
angular acceleration	radian per second squared	rad/s <sup>2</sup>	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
heat flux density, irradiance	watt per square metre	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
heat capacity, entropy	joule per kelvin	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
specific heat capacity, specific entropy	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
specific energy	joule per kilogram	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
energy density	joule per cubic metre	J/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
electric field strength	volt per metre	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
electric charge density	coulomb per cubic metre	C/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
electric flux density	coulomb per square metre	C/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
permittivity	farad per metre	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
permeability	henry per metre	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
molar energy	joule per mole	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
molar entropy, molar heat capacity	joule per mole kelvin	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
exposure (x and γ rays)	coulomb per kilogram	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
absorbed dose rate	gray per second	Gy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
radiant intensity	watt per steradian	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ $= \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
radiance	watt per square metre steradian	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ $= \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
catalytic (activity) concentration	katal per cubic metre	kat/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mol}$

A single SI unit may correspond to several different quantities, as noted in paragraph 1.2 (p. 92). In the above table, which is not exhaustive, there are several examples. Thus the joule per kelvin (J/K) is the SI unit for the quantity heat capacity as well as for the quantity entropy; also the ampere (A) is the SI unit for the base quantity electric current as well as for the derived quantity magnetomotive force. It is therefore important not to use the unit alone to specify the quantity. This rule applies not only to scientific and technical texts but also, for example, to measuring instruments (i.e. an instrument should indicate both the unit and the quantity measured).

A derived unit can often be expressed in different ways by combining the names of base units with special names for derived units. This, however, is an algebraic freedom to be governed by common-sense physical considerations. Joule, for example, may formally be written newton metre, or even kilogram metre squared per second squared, but in a given situation some forms may be more helpful than others.

In practice, with certain quantities preference is given to the use of certain special unit names, or combinations of unit names, in order to facilitate the distinction between different quantities having the same dimension. For example, the SI unit of frequency is designated the hertz, rather than the reciprocal second, and the SI unit of angular velocity is designated the radian per second rather than the reciprocal second (in this case retaining the word radian emphasizes that angular velocity is equal to  $2\pi$  times the rotational frequency). Similarly the SI unit of moment of force is designated the newton metre rather than the joule.

In the field of ionizing radiation, the SI unit of activity is designated the becquerel rather than the reciprocal second, and the SI units of absorbed dose and dose equivalent the gray and sievert, respectively, rather than the joule per kilogram\*. In the field of catalysis, the SI unit of catalytic activity is designated the katal rather than the mole per second. The special names becquerel, gray, sievert and katal were specifically introduced because of the dangers to human health which might arise from mistakes involving the units reciprocal second, joule per kilogram and mole per second.

**Add at the end of Section 3.1 on page 127**

### 3.1 SI derived units

**■ 21st CGPM, 1999, Resolution 12: Special name for the SI derived unit mole per second, the katal, for the expression of catalytic activity**

The 21st Conférence Générale des Poids et Mesures,

**considering**

- the importance for human health and safety of facilitating the use of SI units in the fields of medicine and biochemistry,
- that a non-SI unit called “unit”, symbol U, equal to  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ , which is not coherent with the SI, has been in widespread use in medicine and biochemistry since 1964 for expressing catalytic activity,
- that the absence of a special name for the SI coherent derived unit mole per second has led to results of clinical measurements being given in various local units,
- that the use of SI units in medicine and clinical chemistry is strongly recommended by the international unions in these fields,
- that the International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine has asked the Consultative Committee for Units to recommend the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second,
- that while the proliferation of special names represents a danger for the SI, exceptions are made in matters related to human health and safety (15th General Conference, 1975, Resolutions 8 and 9, 16th General Conference, 1979, Resolution 5),

**noting** that the name katal, symbol kat, has been used for the SI unit mole per second for over thirty years to express catalytic activity,

**decides** to adopt the special name katal, symbol kat, for the SI unit mole per second to express catalytic activity, especially in the fields of medicine and biochemistry,

and **recommends** that when the katal is used, the measurand be specified by reference to the measurement procedure; the measurement procedure must identify the indicator reaction.

---

\* The CIPM, recognizing the particular importance of the health-related units, agreed a detailed text on the sievert for the 5th edition of this brochure: see p. 127, Recommendation 1 (CI-1984) adopted by the CIPM (PV, 1984, 52, 31 and *Metrologia*, 1985, 21, 90).