



**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^e 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 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre.

Le Bureau international a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures 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 γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II) ;
7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce Comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le Comité international en 1954) ;
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980 ;
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (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.

Le BIPM et la Convention du Mètre	5
Avertissement de la 7^e édition	10
1 Introduction	12
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
2 Unités SI	17
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
3 Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI	26
3.1 Préfixes SI	26
3.2 Le kilogramme	26
4 Unités en dehors du SI	27
4.1 Unités en usage avec le SI	27
4.2 Autres unités en dehors du SI	31

5 Règles d'écriture des noms et symboles des unités SI	33
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
Annexe 1. Décisions de la Conférence générale et du Comité international des poids et mesures	35
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
Annexe 2. Mise en pratique des définitions des principales unités	58
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
Index	77

Avertissement de la 7^e 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^e édition est une révision de la 6^e 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.

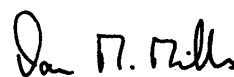
L'annexe 2 décrit sommairement les opérations par lesquelles les laboratoires de métrologie peuvent effectuer les mesures physiques, en conformité avec les définitions théoriques énoncées dans le texte principal, afin de réaliser les unités physiques et de certifier les étalons de la plus haute qualité 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^e édition une traduction en langue anglaise ; cette 7^e 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^e CGPM (1948, Résolution 6 ; CR, 64), chargea le Comité international :

- d'étudier l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure ;
- d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays ;
- 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^e CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) et la 14^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36) adoptèrent comme unités de base de ce système pratique d'unités les unités des sept grandeurs suivantes : longueur, masse, temps, intensité de courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse.

La 11^e CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) adopta le nom *Système international d'unités*, avec l'abréviation internationale SI, pour ce système pratique d'unités 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^{re} 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^e CGPM en 1921, qui étendit les attributions et les responsabilités du Bureau international à d'autres domaines de la physique, et la création du CCE par la 7^e 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^e 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^e CGPM donna le nom *Système international d'unités (SI)* à ce système en 1960. Lors de la 14^e 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^e 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^e 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^e 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^e Assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) en 1991, et dans le rapport du Groupe de travail du CCDS sur l'application de la relativité générale à la métrologie (*Metrologia*, 1997, 34, 261-290).

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 1×10^{-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^e CGPM (1960) par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation du mètre. La 17^e 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^{re} 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^{re} CGPM en 1889 (CR, 34-38) lorsqu'elle sanctionna ce prototype et déclara :

Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.

La 3^e CGPM (1901 ; CR, 70), dans une déclaration tendant à faire cesser l'ambiguïté qui existait dans l'usage courant sur 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^e 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^e 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^e CGPM (1933), la décision formelle de supprimer ces unités « internationales » ne fut prise que par la 9^e 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 2×10^{-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^e 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^e CGPM (1954, Résolution 3 ; CR, 79) qui choisit le point triple de l'eau comme point fixe fondamental en lui attribuant la température de 273,16 K par définition. La 13^e CGPM (1967-1968, 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^e 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}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^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, 8, 36) :

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

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^e CGPM qui adopta pour cette unité un nouveau nom international, la *candela* (symbole cd) ; en 1967, la 13^e CGPM (Résolution 5 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43-44) donna une forme 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^e CGPM (1979, Résolution 3 ; CR, 100 et *Metrologia*, 1980, **16**, 56) adopta une nouvelle définition de la candela :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

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^e CGPM (1954, Résolution 6 ; CR, 80) ; 11^e CGPM (1960, Résolution 12 ; CR, 87) ; 13^e CGPM (1967-1968, Résolution 3 ; CR, 104 et *Metrologia*, 1968, **4**, 43) ; 14^e CGPM (1971, Résolution 3 ; CR, 78 et *Metrologia*, 1972, **8**, 36)).

Tableau 1. Unités 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 ²
volume	mètre cube	m ³
vitesse	mètre par seconde	m/s
accélération	mètre par seconde carrée	m/s ²
nombre d'ondes	mètre à la puissance moins un	m ⁻¹
masse volumique	kilogramme par mètre cube	kg/m ³
volume massique	mètre cube par kilogramme	m ³ /kg
densité de courant	ampère par mètre carré	A/m ²
champ magnétique	ampère par mètre	A/m
concentration (de quantité de matière)	mole par mètre cube	mol/m ³
luminance lumineuse	candela par mètre carré	cd/m ²
indice de réfraction	(le nombre) un	1 ^(a)

(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^e CGPM (1975, Résolutions 8 et 9 ; CR, 105 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180) et la 16^e 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 m⁰, kg⁰, 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 ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
angle solide	stéradian ^(a)	sr ^(c)		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
fréquence	hertz	Hz		s^{-1}
force	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pression, contrainte	pascal	Pa	N/m ²	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
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 ²	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
température Celsius	degré Celsius ^(d)	°C		K
flux lumineux	lumen	lm	cd · sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
éclairement lumineux	lux	lx	lm/m ²	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
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 ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
flux thermique surfacique, éclairage énergétique	watt par mètre carré	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
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 ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
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 ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
déplacement électrique	coulomb par mètre carré	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
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 γ)	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 ² · 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 2π 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^e 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^e 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^e CGPM (1964, Résolution 8 ; CR, 94), ceux pour 10^{15} et 10^{18} par la 15^e CGPM (1975, Résolution 10 ; CR, 106 et *Metrologia*, 1975, **11**, 180-181) et ceux pour 10^{21} , 10^{24} , 10^{-21} et 10^{-24} par la 19^e CGPM (1991, Résolution 4 ; CR, 97 et *Metrologia*, 1992, **29**, 3). Les préfixes et symboles de préfixes qui ont été adoptés figurent au tableau 5.

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	μ
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 μ 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 ^(a)	h	1 h = 60 min = 3600 s
jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
degré ^(b)	°	1° = (π/180) rad
minute	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
seconde	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
litre ^(c)	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonne ^(d,e)	t	1 t = 10 ³ kg
neper ^(f,h)	Np	1 Np = 1
bel ^(g,h)	B	1 B = (1/2) ln 10 (Np) ⁽ⁱ⁾

(a) Le symbole de cette unité est inclus dans la Résolution 7 de la 9^e 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^e 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^e 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 ^(a)	eV	^(b)	1 eV = 1,602 177 33 (49) × 10 ⁻¹⁹ J
unité de masse atomique unifiée ^(a)	u	^(c)	1 u = 1,660 540 2 (10) × 10 ⁻²⁷ kg
unité astronomique ^(a)	ua	^(d)	1 ua = 1,495 978 706 91 (30) × 10 ¹¹ 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 ¹²C, 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)² ua³ · d⁻².

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 ^(a)		1 mille marin = 1852 m
nœud		1 mille marin par heure = (1852/3600) m/s
are ^(b)	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare ^(b)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
bar ^(c)	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 ⁵ Pa
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
barn ^(d)	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²

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

(a) Cette unité et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9^e 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 ^(a)	Ci	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
röntgen ^(b)	R	1 R = $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg
rad ^(c,f)	rad	1 rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy
rem ^(d,f)	rem	1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv
unité X ^(e)		1 unité X $\approx 1,002 \times 10^{-4}$ nm
gamma ^(f)	γ	1 γ = 1 nT = 10^{-9} T
jansky	Jy	1 Jy = 10^{-26} W · m ⁻² · Hz ⁻¹
fermi ^(f)		1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m
carat métrique ^(g)		1 carat métrique = 200 mg = 2×10^{-4} kg
torr	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
atmosphère normale	atm ^(h)	1 atm = 101 325 Pa
calorie	cal	⁽ⁱ⁾
micron ^(f)	μ ^(j)	1 μ = 1 μ m = 10^{-6} m

- (a) Le curie est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer l'activité des radionucléides (12^e CGPM, 1964, Résolution 7 ; CR,94).
- (b) Le röntgen est une unité spéciale employée pour exprimer l'exposition aux rayonnements x ou γ .
- (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^e CGPM en 1907 (CR, 89-91) pour le commerce des diamants, perles fines et pierres précieuses.
- (h) Résolution 4 de la 10^e 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 cal₁₅ = 4,1855 J (valeur adoptée par le Comité international en 1950 ; PV, 1950, 22, 79-80) ;
 - calorie dite « IT » (International Table) : 1 cal_{IT} = 4,1868 J (5th International Conference on Properties of Steam, Londres, 1956) ;
 - calorie dite « thermochimique » : 1 cal_{th} = 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^e CGPM (1948 ; CR,70), ont été supprimés par la 13^e 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^e 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⁻¹.

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^e 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^e 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^e 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^e CGPM (1960)].

2. que soient employées les unités de ce système énumérées au tableau suivant, sans préjudice d'autres unités qu'on pourrait ajouter à l'avenir :
[Suit le tableau des unités reproduit dans le paragraphe 4 de la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960)].

■ **11^e CGPM, 1960, 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 ¹²	tera T	0,1 = 10 ⁻¹	deci d
1 000 000 000 = 10 ⁹	giga G	0,01 = 10 ⁻²	centi c
1 000 000 = 10 ⁶	mega M	0,001 = 10 ⁻³	milli m
1 000 = 10 ³	kilo k	0,000 001 = 10 ⁻⁶	micro μ
100 = 10 ²	hecto h	0,000 000 001 = 10 ⁻⁹	nano n
10 = 10 ¹	deca da	0,000 000 000 001 = 10 ⁻¹²	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^e CGPM (1967-1968, Résolution 3, voir p. 48).

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

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

La 20^e 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	Ω	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^e 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^e 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^e 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^{re} 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^e CGPM, Résolution 6, ci-dessous).

■ **7^e 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^e CGPM, Résolution 6, ci-dessous).

■ **11^e 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^e CGPM, Résolution 1, ci-dessous).

■ **15^e 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^e 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^e Conférence générale des poids et mesures, dans sa Résolution 2 ($c = 299\,792\,458$ m/s),
- qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour effet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à la valeur recommandée, et que cela n'introduit aucune discontinuité appréciable de l'unité de longueur, compte tenu de l'incertitude relative de $\pm 4 \times 10^{-9}$ des meilleures réalisations du mètre dans sa définition actuelle,
- que ces diverses formes, faisant appel soit au trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps spécifié, soit à la longueur d'onde d'une radiation de fréquence mesurée ou de fréquence spécifiée, ont fait l'objet de consultations et de discussions approfondies, qu'elles ont été reconnues équivalentes et qu'un consensus s'est dégagé en faveur de la première forme,
- que le Comité consultatif pour la définition du mètre est dès maintenant en mesure de donner des instructions pour la mise en pratique d'une telle définition, instructions qui pourront inclure l'emploi de la radiation orangée du krypton 86 utilisée jusqu'ici comme étalon et qui pourront être complétées ou révisées par la suite,

La valeur de l'incertitude 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^e 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^{re} CGPM, 1889 (CR, 34-38) : sanction des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme

(voir p. 39)

■ 3^e 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^e 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^e 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^e CGPM,
Résolution 1,
ci-dessous).

■ **12^e 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^e 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^e 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^e 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^e 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 2×10^{-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^e CGPM, 1971 (CR, 78) : pascal, siemens

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

2.5 Température thermodynamique

■ 9^e 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^e 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^e Conférence générale (CR, 64).

■ 10^e 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^e CGPM (1967-1968, Résolution 4, ci-dessous) a explicitement défini le kelvin.

■ 10^e 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^e 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^e 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^e 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^e 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^e session du CCU (1980) précisant que : Dans cette définition, il est entendu que l'on se réfère à des atomes de carbone 12 non liés, au repos et dans leur état fondamental.

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^e 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^e 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^e 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^e CGPM (1967-1968, Résolution 5, ci-dessous).

* Définition abrogée par la 16^e 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 540×10^{12} hertz, a été adoptée par le Comité international des poids et mesures en 1977,
- que cette valeur a été reconnue suffisamment exacte pour le système des grandeurs lumineuses photopiques, qu'elle n'entraîne qu'un changement d'environ 3 % pour le système des grandeurs lumineuses scotopiques et que par conséquent elle assure une continuité satisfaisante,
- que le moment est venu de donner à la candela une définition susceptible d'améliorer la facilité d'établissement des étalons photométriques et leur précision, et qui s'applique aux grandeurs photopiques et scotopiques de la photométrie et aux grandeurs à définir dans le domaine mésopique,

décide

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

3 Décisions relatives aux unités SI dérivées et supplémentaires

3.1 Unités SI dérivées

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

■ 13^e 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^e 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^e 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^e session du CCU (1976), précisant que, suivant l'avis de l'ICRU, le gray peut être employé aussi pour exprimer l'énergie communiquée massique, le kerma et l'indice de dose absorbée.

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^e 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^e Conférence générale des poids et mesures (1979),

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

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

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

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

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^e session,

considérant

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

considérant aussi

- que l'interprétation donnée par le CIPM en 1969 pour la classe des unités supplémentaires introduite dans la Résolution 12 de la 11^e Conférence générale des poids et mesures en 1960 laisse la liberté de traiter le radian et le stéradian comme unités de base dans le Système international,

* La classe des unités supplémentaires dans le SI a été abrogée par décision de la 20^e 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^e CGPM, 1995, Résolution 8 (CR, 121 et *Metrologia*, 1996, 33, 83) : suppression de la classe des unités supplémentaires dans le SI**

La 20^e Conférence générale des poids et mesures,

considérant

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

approuvant l'interprétation donnée par le CIPM en 1980,

décide

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

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

4.1 Préfixes SI

■ **12^e 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^e CGPM (1975, Résolution 10, ci-dessous).

■ **15^e 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^e CGPM, 1991, Résolution 4** (CR, 97 et *Metrologia*, 1992, **29**, 3) : **préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto**

La 19^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), **décide** d'ajouter à la liste des préfixes SI pour la formation des noms des multiples et sous-multiples des unités, adoptée par la 11^e CGPM, Résolution 12, paragraphe 3, la 12^e CGPM, Résolution 8 et la 15^e CGPM, Résolution 10, les préfixes suivants :

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

4.2 Symboles d'unités et nombres

■ **9^e 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^e 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^e CGPM (1967-1968, Résolutions 7 et 3, voir ci-dessous et p. 48), ainsi qu'au litre, 16^e CGPM (1979, Résolution 6, voir p. 56).

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

Remarques

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

4.3 Noms d'unités

■ 13^e 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^e 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^e CGPM (1964, Résolution 6, ci-dessous).

■ 11^e 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^e 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^e 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^e Conférence générale des poids et mesures (1948),

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

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

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

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

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

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

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

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^e 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 λ d'une onde électromagnétique plane de fréquence f ; cette longueur d'onde est obtenue à partir de la mesure de la fréquence f , en utilisant la relation $\lambda = c_0/f$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c_0 = 299\,792\,458$ m/s,

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 λ devraient être rigoureusement liées par la relation $\lambda f = c_0$, avec $c_0 = 299\,792\,458$ m/s, mais les valeurs de λ 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 ^1H , 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⁺ asservi à l'aide d'une cuve à iode, située à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de (-5 ± 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 7×10^{-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 ± 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 3×10^{-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 ± 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 ± 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 ± 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 ± 1) °C, avec une amplitude de modulation de fréquence, crête à creux, de (6 ± 1) MHz.

1.8 Atome absorbant ^{40}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 6×10^{-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}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 CH₄, transition ν₃, P(7), composante F₂⁽²⁾

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 3×10^{-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 ≤ 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⁻² ;
- rayon de courbure des surfaces d'onde ≥ 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 OsO₄, transition en coïncidence avec la raie laser ¹²C¹⁶O₂, R(12)

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

avec une incertitude-type relative de 6×10^{-12} , s'appliquent à la radiation émise par un laser à CO₂ asservi sur une cuve à OsO₄, 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 2p₁₀ et 5d₅ de l'atome de ⁸⁶Kr

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

avec une incertitude relative élargie, $U = ku_c$ ($k = 3$), de 4×10^{-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 1×10^{-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}Kr , ^{198}Hg et ^{114}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, λ , et d'incertitudes, pour certaines transitions des atomes de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd , ainsi que les conditions d'utilisation suivantes :

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions du ^{86}Kr

Transition	λ/pm
$2p_9 - 5d'_4$	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}Kr , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 2×10^{-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, λ , de transitions du ^{198}Hg

Transition	λ/pm
$6^1P_1 - 6^1D_2$	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}Hg , les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 5×10^{-8} en valeur relative, aux radiations émises par une lampe à décharge, lorsque les

L'incertitude figurant dans le document de 1960 était de 1×10^{-8} , elle a ensuite été modifiée et portée à 4×10^{-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 cm³.

Longueurs d'onde dans le vide, λ , de transitions du ¹¹⁴Cd

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 ¹¹⁴Cd, les valeurs ci-dessus s'appliquent, avec une incertitude de 7×10^{-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 ¹²⁷I₂, transition 17-1, P(62) composante a₁, 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 4×10^{-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 ± 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 1×10^{-9} .

L'augmentation relative de la masse du prototype international est d'environ 1×10^{-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 1×10^{-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 2×10^{-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 1×10^{-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^e 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^{er} 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 2×10^{-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 5×10^{-15} s. On diminue cet écart en pilotant la fréquence du TAI

par application de corrections d'amplitude relative égale à 1×10^{-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^e 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^{er} 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^e 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^e 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^{er} 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^{er} 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^e Conférence générale des poids et mesures concernant l'ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm,

considérant

- qu'une étude approfondie des résultats des déterminations les plus récentes

conduit à une valeur de 483 597,9 GHz/V pour la constante de Josephson, K_J , c'est-à-dire pour le quotient de la fréquence par la tension correspondant au palier de rang $n = 1$ dans l'effet Josephson,

- que l'effet Josephson, avec cette valeur de K_J , peut être utilisé pour établir un étalon de référence de force électromotrice dont l'incertitude (écart-type), par rapport au volt, est estimée à 4×10^{-7} en valeur relative et dont la reproductibilité est nettement meilleure,

recommande

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

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

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

■ **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^e Conférence générale des poids et mesures concernant l'ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm,

considérant

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

recommande

- que l'on adopte par convention, pour la constante de von Klitzing, R_K , la valeur $R_{K-90} = 25\,812,807$ Ω exactement,

- que cette valeur soit utilisée à partir du 1^{er} janvier 1990, et non auparavant, par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Hall quantique leurs mesures de résistance électrique,
- qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec R_{K-90} ,
- que, pour établir un étalon de référence de résistance électrique fondé sur l'effet Hall quantique, les laboratoires suivent les conseils pour la mise en 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 μ_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^e 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^{er} 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^e 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^e Conférence générale des poids et mesures en 1987 (Résolution 7), a adopté l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) en remplacement de l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (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^{er} 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}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}F et l'atome de carbone ^{12}C ont des masses qui sont dans un rapport de 18,9984/12 environ. La masse molaire du gaz moléculaire 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 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 α et β 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**