

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



*Le Système International
d'Unités
(SI)*

6^e Édition

Textes français et anglais
French and English texts

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

—
1991

*Le Système International
d'Unités
(SI)*

6^e Édition

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

—
1991

ISBN 92-822-2112-1

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⁽¹⁾.

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 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 déterminations relatives aux constantes physiques 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).

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- 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 est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un rapport annuel sur la situation administrative et financière du Bureau International.

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 (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.

(¹) En mars 1991, quarante-six États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. Pop. Dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Israël, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Une quarantaine de physiciens ou 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 dans les domaines mentionnés ci-dessus. 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, le Comité International a institué depuis 1927, 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 des recommandations concernant les unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p.97). Chaque comité consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués de chacun des grands laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers ; ils sont actuellement au nombre de huit :

1. Le 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 Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), qui s'est appelé pour un temps Comité Consultatif de Thermométrie et Calorimétrie (CCTC), créé en 1937.
4. Le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le 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 CIPM en 1954).
8. Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des comités consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes :

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* ;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures* ;
- *Sessions des comités consultatifs* ;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (ce Recueil hors commerce rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

Le Système International d'Unités *

TABLE DES MATIÈRES

	Pages	
	Français	Anglais
LE BIPM ET LA CONVENTION DU MÈTRE	3	63
AVERTISSEMENT	6	66
I. <i>Introduction</i>	7	67
I.1. Historique	7	67
I.2. Les trois classes d'unités SI	7	67
I.3. Les préfixes SI	8	68
I.4. Système de grandeurs	8	68
I.5. Législations sur les unités	8	68
II. <i>Unités SI</i>	9	69
II.1. Unités SI de base	9	69
II.1.1. Définitions	9	69
II.1.2. Symboles	12	72
II.2. Unités SI dérivés	12	72
II.3. Unités SI supplémentaires	15	75
II.4. Règles d'écriture et d'emploi des symboles des unités SI	16	76
III. <i>Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI</i>	17	77
III.1. Préfixes SI	17	77
III.2. Règles d'emploi des préfixes SI	17	77
III.3. Le kilogramme	18	78
IV. <i>Unités en dehors du Système International</i>	19	79
IV.1. Unités en usage avec le Système International	19	79
IV.2. Unités maintenues temporairement	20	80
IV.3. Unités CGS	21	81
IV.4. Autres unités	22	82
ANNEXE I. — Décisions de la Conférence Générale et du Comité International des Poids et Mesures	23	83
ANNEXE II. — Mise en pratique des définitions des principales unités	46	106
INDEX	57	117

* 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. De nombreux pays ont aussi publié des guides pour l'emploi des unités SI.

AVERTISSEMENT DE LA 6^e ÉDITION

Depuis 1970, le Bureau International des Poids et Mesures publie régulièrement ce document dans lequel est rassemblé dans un ordre systématique le contenu des Résolutions et des Recommandations de la Conférence Générale et du Comité International des Poids et Mesures concernant le Système International d'Unités. On y a ajouté des commentaires explicatifs et des règles d'utilisation pratique extraites des Normes internationales d'usage général adoptées par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO).

Le Comité Consultatif des Unités auprès du Comité International des Poids et Mesures a contribué à la rédaction de ce document. Le texte définitif a été soumis à son contrôle.

Dans l'Annexe I sont reproduites, dans leur ordre chronologique, les décisions (Résolutions, Recommandations, Déclarations, etc.), prises depuis 1889 par la Conférence Générale et le Comité International des Poids et Mesures en rapport avec les unités de mesure et le Système International d'Unités.

Dans l'Annexe II, on décrit sommairement les opérations par lesquelles les grands laboratoires de métrologie peuvent effectuer les mesures physiques en conformité avec le texte de la définition des principales unités, afin d'indiquer comment les définitions théoriques énoncées dans ce document peuvent être mises en pratique pour la certification des étalons de précision. Sauf avis contraire, les incertitudes sont exprimées par l'écart-type.

Cette 6^e édition est une révision de la 5^e édition (1985); elle tient compte des dernières décisions de la 18^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1987), du Comité International des Poids et Mesures (1988, 1989, 1990) et des amendements apportés par le Comité Consultatif des Unités (1990).

Les éditions antérieures de ce document ont été utilisées dans de nombreux pays comme ouvrage de référence. Afin d'en rendre la consultation plus facilement accessible à un nombre plus grand de lecteurs, le Comité International des Poids et Mesures a décidé d'y inclure une traduction en langue anglaise. Le Bureau International des Poids et Mesures s'est efforcé de publier une traduction la plus fidèle possible, en faisant appel à la collaboration du National Physical Laboratory (Teddington, Royaume-Uni) et du National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, États-Unis d'Amérique). Les petites variantes d'orthographe que l'on rencontre dans les pays de langue anglaise (par exemple: « metre » et « meter », « litre » et « liter ») constituent une difficulté particulière. Généralement cette traduction suit l'usage recommandé par l'ISO (1982) pour les questions de vocabulaire et d'orthographe des noms des grandeurs et des unités, ainsi que pour l'écriture des nombres. Toutefois, cette traduction en langue anglaise ne constitue pas un texte officiel. En cas de discussion, c'est toujours le texte français qui fait foi.

Février 1991

T. J. QUINN

*Directeur du Bureau International
des Poids et Mesures*

J. DE BOER

*Président du Comité
Consultatif des Unités*

I. INTRODUCTION

I.1. Historique

C'est en 1948 que la 9^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), par sa Résolution 6, a chargé le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) :

« d'étudier l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure » ;

« d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays » et

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

Cette même Conférence Générale adopta aussi la Résolution 7 qui fixait des principes généraux pour les symboles d'unités et donnait déjà une liste de noms spéciaux d'unités.

La 10^e CGPM (1954) par sa Résolution 6 et la 14^e CGPM (1971) par sa Résolution 3 décidèrent d'adopter, 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) par sa Résolution 12 adopta le nom *Système International d'Unités*, avec l'abréviation internationale SI, pour ce système pratique d'unités de mesure et donna 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.

I.2. Les trois classes d'unités SI

Dans le Système International, on distingue trois classes d'unités SI :

unités de base, unités dérivées, unités supplémentaires.

Du point de vue scientifique, il y a un élément arbitraire dans cette division des unités SI en ces trois classes, parce que cette division n'est pas imposée d'une façon univoque par la physique.

Néanmoins, la Conférence Générale prenant en considération les avantages de l'adoption d'un système d'unités pratique et unique, qui pourrait être utilisé dans le monde entier dans les relations internationales, dans l'enseignement et dans la recherche scientifique, décida 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* II.1, p. 9). Ces unités SI sont appelées *unités de base*.

La deuxième classe des unités SI contient les *unités dérivées*, c'est-à-dire les unités qui peuvent être formées en combinant les unités de base d'après des relations algébriques choisies qui lient les grandeurs correspondantes. Les noms et les symboles de certaines unités ainsi formées en fonction des unités de base peuvent être remplacés par des noms et des symboles spéciaux ; ceux-ci peuvent être utilisés pour la formation des expressions et symboles d'autres unités dérivées (*voir* II.2, p. 12).

La 11^e CGPM (1960) a admis une troisième classe d'unités SI, appelées *unités supplémentaires*, qui contient les unités d'angle plan et d'angle solide (voir II.3, p. 15).

Les unités SI de ces trois classes forment un ensemble cohérent d'unités au sens donné habituellement au mot « cohérent », c'est-à-dire un système d'unités liées mutuellement par des règles de multiplication et division sans facteur numérique. Suivant la Recommandation 1 (1969) du CIPM, 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 le nom de cette unité peut être exprimé sous différentes formes, mais que l'inverse n'est pas vrai : un même nom d'unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes (voir p. 14).

I.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 III.1, p. 17). Suivant la Recommandation 1 (1969) du CIPM, l'ensemble de ces préfixes est désigné sous le nom de *préfixes 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 des unités SI* pour les distinguer de l'ensemble cohérent des unités SI proprement dites.

I.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)* 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 ⁽¹⁾.

Dans ces Normes internationales, l'ISO a adopté un système de grandeurs physiques fondé sur les sept grandeurs de base : longueur, masse, temps, intensité de courant électrique, température thermodynamique, quantité de matière et intensité lumineuse. Les autres grandeurs — les 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.

I.5. Législations 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 ou la sécurité publique, l'enseignement, etc. Dans un nombre croissant de pays, ces législations sont fondées sur l'emploi du Système International d'Unités.

L'*Organisation Internationale de Métrologie Légale*, créée en 1955, s'occupe de l'harmonisation internationale de ces législations.

⁽¹⁾ Normes ISO 31, in « Unités de mesure » (Recueil de Normes ISO 2, 2^e édition), ISO, Genève, 1982, pp. 19-238.

II. UNITÉS SI

II.1. Unités SI de base

II.1.1. Définitions

a) 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'augmenter la précision de la réalisation du mètre, la 17^e CGPM (1983) a remplacé 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 (17^e CGPM (1983), Résolution 1).

L'ancien prototype international du mètre, qui fut sanctionné par la 1^{re} CGPM en 1889, est toujours conservé au Bureau International des Poids et Mesures dans les conditions fixées en 1889.

b) unité de
masse
(kilogramme)

Le prototype international du kilogramme fut sanctionné par la 1^{re} CGPM (1889) qui déclara que *ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse.*

La 3^e CGPM (1901), 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* (voir la déclaration complète p. 24).

Ce prototype international en platine iridié est conservé au Bureau International dans des conditions qui ont été fixées par la 1^{re} CGPM en 1889.

c) unité de
temps
(seconde)

La seconde, unité de temps, était définie primitivement comme la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen. La définition exacte du « jour solaire moyen » était laissée aux astronomes, mais 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) a sanctionné une définition, donnée par l'Union Astronomique Internationale, qui était fondée sur l'année tropique. En même temps, 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, pourrait être réalisé et reproduit avec une précision beaucoup plus élevée. Considérant qu'une définition de haute précision de l'unité de temps du Système International, la seconde, est indispensable pour les exigences de la haute métrologie, la 13^e CGPM (1967) a décidé de remplacer 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 (13^e CGPM (1967), Résolution 1).

d) 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 (*):

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 (CIPM (1946), Résolution 2 approuvée par la 9^e CGPM (1948)).

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

e) unité de température thermodynamique (kelvin)

La définition de l'unité de température thermodynamique a été donnée en fait par la 10^e CGPM (1954, Résolution 3) qui a choisi 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, Résolution 3) adopta le nom *kelvin* (symbole K) au lieu de « degré Kelvin » (symbole °K) et formula dans sa Résolution 4 la définition de l'unité de température thermodynamique comme suit :

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau (13^e CGPM (1967), Résolution 4).

La 13^e CGPM (1967, Résolution 3) décida aussi que l'unité kelvin et son symbole K sont utilisés pour exprimer un intervalle ou une différence de température.

Remarque. — En dehors de la température thermodynamique (symbole T), exprimée en kelvins, on utilise aussi la température Celsius (symbole t) définie par l'équation :

$$t = T - T_0$$

où $T_0 = 273,15$ K par définition. Pour exprimer la température Celsius, on utilise l'unité « degré Celsius » qui est égale à l'unité « kelvin »; « degré Celsius » est un nom spécial employé dans ce cas au lieu de « kelvin ». Un intervalle ou une différence de température Celsius peuvent toutefois s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius.

f) unité de quantité de matière (mole)

Depuis la découverte des lois fondamentales de la chimie, on a utilisé, pour spécifier les quantités des divers éléments ou composés chimiques, des unités de quantité de matière qui portèrent 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 (16 par convention). Mais, tandis que les physiciens séparaient les

(*) Au lieu du nom « intensité de courant électrique » on utilise maintenant « courant électrique » (voir note (1) au bas de la page 8).

isotopes au spectrographe de masse et attribuaient la valeur 16 à l'un des isotopes de l'oxygène, les chimistes attribuaient la même valeur au mélange (légèrement variable) des isotopes 16, 17 et 18 qui était pour eux 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 à l'isotope 12 du carbone. 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 » ⁽²⁾ a reçu le nom de *mole* (symbole mol).

Suivant les propositions de l'UIPPA, de l'UICPA et de l'ISO, le CIPM a donné en 1967 et confirmé en 1969 une définition de la mole qui a été finalement adoptée par la 14^e CGPM (1971, Résolution 3) :

1^o *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.*

2^o *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.*

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

Cette définition précise en même temps la nature de la grandeur dont la mole est l'unité.

g) 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 décision, préparée dès avant 1937 par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) et par le Comité International des Poids et Mesures, fut prise par le CIPM en 1946, puis 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 donna une forme amendée à la définition de 1946.

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 a adopté en 1979 la nouvelle définition suivante :

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 (16^e CGPM (1979), Résolution 3).

(²) Le nom de cette grandeur, adopté par l'UIPPA, l'UICPA et l'ISO, est en français « quantité de matière » et en anglais « amount of substance »; (les traductions en allemand et en russe sont « Stoffmenge » et « количество вещества »). Le nom français rappelle « quantitas materiae » utilisé dans le passé pour désigner la grandeur appelée aujourd'hui « masse »; il faut oublier cette signification ancienne, car la masse et la quantité de matière sont deux grandeurs bien distinctes.

II.1.2. Symboles

Les unités de base du Système International sont rassemblées dans le tableau 1 avec leurs noms et leurs symboles (10^e CGPM (1954), Résolution 6; 11^e CGPM (1960), Résolution 12; 13^e CGPM (1967), Résolution 3; 14^e CGPM (1971), Résolution 3).

TABLEAU 1
Unités SI de base

Grandeur	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

II.2. Unités SI dérivées

A partir des unités de base, les unités dérivées sont données par des expressions algébriques en utilisant les symboles mathématiques de multiplication et de division (*voir* quelques exemples au tableau 2).

TABLEAU 2
Exemples d'unités SI dérivées exprimées à partir des unités de base

Grandeur	Unité SI	
	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

Certaines unités dérivées ont reçu un nom spécial et un symbole particulier. Ces noms et symboles sont donnés aux tableaux 3 et 3 bis; ils peuvent eux-mêmes être utilisés pour exprimer d'autres unités dérivées (*voir* quelques exemples au tableau 4).

Dans la dernière colonne des tableaux 3, 3 bis, 4 et 5 on trouve l'expression des unités SI mentionnées en fonction des unités SI de base. Dans cette colonne, les facteurs tels que m^0 , kg^0 , etc., égaux à 1, ne sont généralement pas écrits explicitement.

TABLEAU 3
Unités SI dérivées ayant des noms spéciaux

Grandeur	Unité SI			
	Nom	Symbole	Expression en d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
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	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
puissance, flux énergétique	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
quantité d'électricité, charge électrique	coulomb	C		$s \cdot A$
potentiel électrique, tension 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	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
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 ^(a) ..	degré Celsius	$^{\circ}C$		K
flux lumineux	lumen	lm		$cd \cdot sr$
éclairage lumineux ...	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$ } ^(b)

^(a) Voir p. 10, e, Remarque.

^(b) En photométrie, on maintient le symbole du stéradian, sr, dans l'expression des unités (voir II.3, p. 15).

TABLEAU 3 bis
Unités SI dérivées ayant des noms spéciaux admis pour la sauvegarde de la santé humaine

Grandeur	Unité SI			
	Nom	Symbole	Expression en d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
activité (d'un radionucléide)	becquerel	Bq		s^{-1}
dose absorbée, énergie communiquée massique, kerma, indice de dose absorbée	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
équivalent de dose, indice d'équivalent de dose ..	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

TABLEAU 4

*Exemples d'unités SI dérivées
exprimées en utilisant des noms spéciaux*

Grandeur	Unité SI		
	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	$kg \cdot s^{-2}$
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	$m^2 \cdot s^{-3}$

Un même nom d'unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes, comme on l'a mentionné au paragraphe I.2 (p. 8). Dans les tableaux 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. Le nom de l'unité ne suffit donc pas pour faire connaître la grandeur mesurée; en particulier, les appareils de mesure devraient 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 différentes en utilisant des noms d'unités de base et des noms spéciaux d'unités dérivées : au lieu de joule, par exemple, on peut écrire newton mètre ou bien kilogramme mètre carré par seconde carrée. Néanmoins, cette liberté algébrique est limitée par des considérations physiques de bon sens.

En pratique, on emploie de préférence certains noms spéciaux d'unités ou certaines combinaisons d'unités pour exprimer certaines grandeurs, afin de faciliter la distinction entre des grandeurs ayant la même dimension. Par exemple, on appelle l'unité SI de fréquence hertz, plutôt que seconde à la puissance moins un, et on appelle l'unité SI de moment d'une force newton mètre, plutôt que joule.

Dans le domaine des rayonnements ionisants, on appelle de même l'unité 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 ⁽³⁾.

Remarque : Grandeurs exprimées par des nombres purs. — Certaines grandeurs, dites sans dimension, comme par exemple l'indice de réfraction, la perméabilité relative ou le facteur de frottement, sont définies par le rapport de deux grandeurs comparables. De telles grandeurs ont un produit de dimensions — ou dimension — égal à 1 et sont donc exprimées par des nombres purs. L'unité cohérente est alors le rapport de deux unités SI égales et peut être exprimée par le nombre 1.

II.3. Unités SI supplémentaires

Cette classe contient deux unités : l'unité SI d'angle plan, le *radian*, et l'unité SI d'angle solide, le *stéradian* (11^e CGPM (1960), Résolution 12).

Considérant que l'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 afin de maintenir la cohérence interne du Système International, fondé sur sept unités de base seulement, le CIPM (1980) a précisé que, dans le Système International, les unités supplémentaires radian et stéradian sont des unités dérivées sans dimension. Ceci implique que les grandeurs angle plan et angle solide sont considérées comme des grandeurs dérivées sans dimension.

TABLEAU 5
Unités SI supplémentaires

Grandeur	Unité SI		
	Nom	Symbole	Expression en unités SI de base
angle plan	radian	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
angle solide	stéradian	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$

⁽³⁾ Voir, page 44, la Recommandation 1 (CI-1984) adoptée par le CIPM.

Ces unités supplémentaires peuvent être utilisées ou non dans les expressions des unités dérivées, afin de faciliter la distinction entre des grandeurs de nature différente ayant la même dimension. Des exemples de l'utilisation des unités supplémentaires pour former des unités dérivées sont donnés dans le tableau 6.

TABLEAU 6
Exemples d'unités SI dérivées
que l'on exprime en utilisant les unités supplémentaires

Grandeur	Unité SI	
	Nom	Symbole
vitesse angulaire	radian par seconde	rad/s
accélération angulaire	radian par seconde carrée	rad/s ²
intensité énergétique	watt par stéradian	W/sr
luminance énergétique	watt par mètre carré stéradian	W · m ⁻² · sr ⁻¹

II.4. Règles d'écriture et d'emploi des symboles des unités SI

Les principes généraux concernant l'écriture des symboles des unités étaient déjà adoptés par la 9^e CGPM (1948, Résolution 7). Ces principes sont :

1. Les symboles des unités sont imprimés en caractères romains (droits) et en général minuscules. Toutefois, si le nom de l'unité dérive d'un nom propre la première lettre du symbole est majuscule.
2. Les symboles des unités restent invariables au pluriel.
3. Les symboles des unités ne sont pas suivis d'un point.

Les Normes internationales de l'ISO ont en outre donné des recommandations pour uniformiser les modalités d'emploi des symboles des unités SI. Suivant ces recommandations :

a) Le produit de deux ou plusieurs unités peut être indiqué d'une des manières suivantes,

$$\text{par exemple : } N \cdot m \text{ ou } Nm$$

b) 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,

$$\text{par exemple : } m/s, \frac{m}{s} \text{ ou } m \cdot s^{-1}$$

c) On ne doit jamais introduire sur la même ligne plus d'une barre oblique, 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,

$$\text{par exemple } \left\{ \begin{array}{l} m/s^2 \quad \text{ou} \quad m \cdot s^{-2} \\ m \cdot kg/(s^3 \cdot A) \quad \text{ou} \quad m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} \end{array} \right. \text{ mais non pas } \begin{array}{l} m/s/s \\ m \cdot kg/s^3/A \end{array}$$

III. MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES DÉCIMAUX DES UNITÉS SI

III.1. Préfixes SI

La 11^e CGPM (1960, Résolution 12) a adopté une première série de préfixes et symboles de préfixes pour former les noms et symboles des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI. Les préfixes pour 10^{-15} et 10^{-18} furent ajoutés par la 12^e CGPM (1964, Résolution 8) et ceux pour 10^{15} et 10^{18} par la 15^e CGPM (1975, Résolution 10). Ceux pour 10^{21} , 10^{24} , 10^{-21} et 10^{-24} ont été retenus par le CIPM (1990) pour être soumis à l'approbation de la 19^e CGPM (1991).

TABLEAU 7

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

III.2. Règles d'emploi des préfixes SI

En accord avec les principes généraux adoptés par l'ISO, le CIPM 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 qu'on peut combiner avec d'autres symboles d'unités pour former des symboles d'unités composées,

$$\begin{aligned} \text{par exemple : } 1 \text{ cm}^3 &= (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ cm}^{-1} &= (10^{-2} \text{ m})^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1} \\ 1 \mu\text{s}^{-1} &= (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1} \\ 1 \text{ V/cm} &= (1 \text{ V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m} \end{aligned}$$

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

$$\text{par exemple : } 1 \text{ nm} \text{ mais non pas : } 1 \text{ m}\mu\text{m}$$

4. Un préfixe ne doit jamais être employé seul,

$$\text{par exemple : } 10^6/\text{m}^3 \text{ mais non pas : } \text{M}/\text{m}^3$$

III.3. Le kilogramme

Parmi les unités de base du Système International, l'unité de masse est la seule dont le nom, pour des raisons historiques, contient un préfixe. Les noms des multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse sont formés par l'adjonction des préfixes au mot « gramme » (CIPM (1967), Recommandation 2),

par exemple : 10^{-6} kg = 1 milligramme (1 mg)
mais non pas 1 microkilogramme (1 μ kg)

IV. UNITÉS EN DEHORS DU SYSTÈME INTERNATIONAL

IV.1. Unités en usage avec le Système International

Le CIPM (1969) a reconnu que les utilisateurs du SI auront besoin d'employer conjointement certaines unités qui sont en dehors du Système International, mais qui jouent un rôle important et sont largement répandues. Ces unités sont données dans le tableau 8. La combinaison d'unités de ce tableau avec des unités SI pour former des unités composées ne doit être pratiquée que dans des cas limités afin de ne pas perdre les avantages de la cohérence des unités SI.

TABLEAU 8

Unités 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 = 3 600 s
jour	d	1 d = 24 h = 86 400 s
degré	°	1° = (π/180) rad
minute	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
seconde	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
litre ^(b)	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonne ^(c)	t	1 t = 10 ³ kg

^(a) Le symbole de cette unité est inclus dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948).

^(b) Cette unité et le symbole l ont été adoptés par le Comité International en 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41); l'autre symbole, L, a été adopté par la 16^e CGPM (1979, Résolution 6) pour permettre éventuellement d'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).

^(c) Cette unité et son symbole ont été adoptés par le Comité International en 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41).

De même, il est nécessaire d'admettre quelques autres unités en dehors du Système International, dont l'emploi est utile dans des domaines spécialisés, parce que leur valeur exprimée en unités SI doit être obtenue expérimentalement et n'est donc pas connue exactement (tableau 9).

TABLEAU 9

*Unités en usage avec le Système International,
dont la valeur en unités SI est obtenue expérimentalement ^(a)*

Nom	Symbole	Définition
électronvolt	eV	^(b)
unité de masse atomique (unifiée)	u	^(c)

^(a) 1 eV = 1,602 177 33 (49) × 10⁻¹⁹ J,
1 u = 1,660 540 2 (10) × 10⁻²⁷ kg,
valeurs données dans *CODATA Bulletin*, n° 63, 1986; l'incertitude sur les deux derniers chiffres, estimée comme un écart-type, est donnée entre parenthèses.

^(b) L'électronvolt est l'énergie cinétique acquise par un électron en traversant une différence de potentiel de 1 volt dans le vide.

^(c) L'unité de masse atomique (unifiée) est égale à 1/12 de la masse d'un atome du nucléide ¹²C.

IV.2. Unités maintenues temporairement

En raison de la force des usages existants dans certains pays et dans certains domaines, le CIPM (1978) a jugé acceptable que les unités contenues dans le tableau 10 continuent à être utilisées, conjointement avec les unités SI, jusqu'à ce qu'il estime que leur emploi n'est plus nécessaire. Toutefois, ces unités ne doivent pas être introduites là où elles n'ont pas été utilisées jusqu'ici.

TABLEAU 10
*Unités maintenues temporairement
avec le Système International*

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
mille marin ^(a)		1 mille marin = 1 852 m
noeud		1 mille marin par heure = (1 852/3 600) m/s
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
are ^(b)	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare ^(b)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
barn ^(c)	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²
bar ^(d)	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1 000 hPa = 10 ⁵ Pa
gal ^(e)	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
curie ^(f)	Ci	1 Ci = 3,7 × 10 ¹⁰ Bq
röntgen ^(g)	R	1 R = 2,58 × 10 ⁻⁴ C/kg
rad ^(h)	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
rem ⁽ⁱ⁾	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv

^(a) Le mille est une unité spéciale employée en navigation maritime et aérienne pour exprimer les distances. Cette valeur conventionnelle fut adoptée par la Première Conférence Hydrographique Internationale Extraordinaire, Monaco, 1929, sous le nom de « mille marin international ».

^(b) Cette unité et son symbole ont été adoptés par le Comité International en 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41) et sont utilisés pour exprimer des superficies agraires.

^(c) Le barn est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer les sections efficaces.

^(d) Cette unité et son symbole sont inclus dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948).

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

^(f) Le curie est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer l'activité des radionucléides (12^e CGPM (1964), Résolution 7).

^(g) Le röntgen est une unité spéciale employée pour exprimer l'exposition des rayonnements X ou γ.

^(h) 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.

⁽ⁱ⁾ Le rem est une unité spéciale employée en radioprotection pour exprimer l'équivalent de dose.

IV.3. Unités CGS

Dans le domaine de la mécanique, le système d'unités CGS était fondé sur trois unités de base : le centimètre, le gramme et la seconde. Dans le domaine de l'électricité et du magnétisme, les unités étaient exprimées en fonction de ces trois unités de base ; cela a conduit à établir plusieurs systèmes différents, par exemple le Système CGS électrostatique, le Système CGS électromagnétique et le Système CGS de Gauss. Dans ces derniers systèmes, le système de grandeurs et le système d'équations correspondant sont souvent différents de ceux que l'on utilise avec les unités SI.

Le CIPM estime qu'il est en général préférable de ne pas utiliser conjointement avec les unités du Système International les unités du système CGS ayant reçu un nom spécial⁽⁴⁾. De telles unités sont mentionnées dans le tableau 11.

TABLEAU 11
Unités CGS ayant des noms spéciaux

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
erg ^(a)	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
dyn ^(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)	Gs, G	1 Gs correspond à 10 ⁻⁴ T
oersted ^(b)	Oe	1 Oe correspond à (1 000/4 π) A/m
maxwell ^(b)	Mx	1 Mx correspond à 10 ⁻⁸ Wb
stilb ^(a)	sb	1 sb = 1 cd/cm ² = 10 ⁴ cd/m ²
phot	ph	1 ph = 10 ⁴ lx

^(a) Cette unité et son symbole étaient inclus dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948).

^(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.

⁽⁴⁾ Le Système International d'Unités, et les recommandations contenues dans ce document, ont pour objet une meilleure uniformité, donc une meilleure compréhension mutuelle dans l'usage général. Cependant, dans quelques domaines spécialisés de la recherche scientifique, en particulier en physique théorique, il peut exister parfois des motifs sérieux justifiant l'emploi d'autres systèmes ou d'autres unités.

Quelles que soient ces unités, il est important que les *symboles* employés pour les représenter soient conformes aux recommandations internationales en vigueur.

IV.4. Autres unités

En ce qui concerne les unités qui sont en dehors du Système International et qui ne sont pas considérées dans les sections IV.1, 2 et 3, le CIPM estime qu'il est en général préférable de les éviter et de les remplacer par des unités du Système International. Quelques-unes de ces unités sont mentionnées dans le tableau 12.

TABLEAU 12
Autres unités généralement déconseillées

Nom	Valeur en unité SI
fermi	1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m
carat métrique ^(a)	1 carat métrique = 200 mg = 2×10^{-4} kg
torr	1 torr = (101 325/760) Pa
atmosphère normale (atm) ^(b)	1 atm = 101 325 Pa
kilogramme-force (kgf)	1 kgf = 9,806 65 N
calorie (cal) ^(c)	
micron (μ) ^(d)	1 μ = 1 μ m = 10^{-6} m
unité X ^(e)	
stère (st) ^(f)	1 st = 1 m ³
gamma (γ)	1 γ = 1 nT = 10^{-9} T
γ ^(g)	1 γ = 1 μ g = 10^{-9} kg
λ ^(h)	1 λ = 1 μ l = 10^{-6} l = 10^{-9} m ³

^(a) Cette appellation a été adoptée par la 4^e CGPM (1907, pp. 89-91) pour le commerce des diamants, perles fines et pierres précieuses.

^(b) Résolution 4 de la 10^e CGPM (1954). La désignation « atmosphère normale » reste admise pour la pression de référence 101 325 Pa.

^(c) Plusieurs calories ont été en usage :
— calorie dite « à 15 °C » : 1 cal₁₅ = 4,185 5 J (valeur adoptée par le CIPM en 1950 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 22, 1950, pp. 79-80));
— calorie dite « IT » (International Table) : 1 cal_{IT} = 4,186 8 J (5th International Conference on Properties of Steam, London, 1956);
— calorie dite « thermochimique » : 1 cal_{th} = 4,184 J.

^(d) Ce nom d'unité et son symbole, qui avaient été adoptés par le Comité International en 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41) et repris dans la Résolution 7 de la 9^e CGPM (1948), ont été supprimés par la 13^e CGPM (1967, Résolution 7).

^(e) Cette unité spéciale fut employée pour exprimer les longueurs d'onde des rayons X; 1 unité X = $1,002 \times 10^{-4}$ nm approximativement.

^(f) Cette unité spéciale, employée dans le mesurage du bois de chauffage, a été adoptée par le Comité International en 1879 avec le symbole « s » (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41). La 9^e CGPM (1948, Résolution 7) a changé ce symbole en « st ».

^(g) Ce symbole est mentionné dans *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1880, p. 56.

^(h) Ce symbole est mentionné dans *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1880, p. 30.

ANNEXE I

Décisions de la Conférence Générale et du Comité International des Poids et Mesures

Les principales décisions abrogées, modifiées ou complétées au cours des années sont signalées par un astérisque (*). Ces renvois, ainsi que les notes de bas de page, ont été ajoutés par le BIPM pour faciliter la consultation des textes.

C.R. : *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).*
P.V. : *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM).*

1^{re} CGPM, 1889

mètre
kilogramme

- *Sanction des prototypes internationaux du mètre et du kilogramme (C.R., pp. 34-38)*

La Conférence Générale,

considérant

le « Compte rendu du Président du Comité International » et le « Rapport du Comité International des Poids et Mesures », d'où il résulte que, par les soins communs de la Section française de la Commission internationale du Mètre, et du Comité International des Poids et Mesures, les déterminations métrologiques fondamentales des prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme ont été exécutées dans toutes les conditions de garantie et de précision que comporte l'état actuel de la science;

que les prototypes internationaux et nationaux du mètre et du kilogramme sont formés de platine allié à 10 pour 100 d'iridium, à 0,000 1 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 :

.....

* Définition abrogée en 1960 (voir page 30 : 11^e CGPM, Résolution 6).

3^e CGPM, 1901

litre — *Déclaration concernant la définition du litre (C.R., p. 38) **

.....

La Conférence déclare :

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

2°

* Définition abrogée en 1964 (voir page 34 : 12^e CGPM, Résolution 6).

masse et poids — *Déclaration relative à l'unité de masse et à la définition du poids; valeur*
 g_n *conventionnelle de g_n (C.R., p. 70)*

Vu la décision du Comité International des Poids et Mesures du 15 octobre 1887, par laquelle le kilogramme a été défini comme unité de masse ⁽¹⁾;

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. » ⁽²⁾.

⁽¹⁾ « La masse du Kilogramme international est prise comme unité pour le Service international des Poids et Mesures » (P.V., 1887, p. 88).

⁽²⁾ Cette « valeur normale » conventionnelle de référence ($g_n = 9,806 65 \text{ m/s}^2$) a été confirmée en 1913 par la 5^e CGPM (C.R., p. 44). C'est la valeur que l'on doit utiliser si l'on désire réduire à la pesanteur normale des observations exécutées en un lieu donné de la Terre.

7^e CGPM, 1927

mètre — *Définition du mètre par le Prototype international* (C.R., p. 49) *

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

* Définition abrogée en 1960 (voir page 30 : 11^e CGPM, Résolution 6).

CIPM, 1946

unités
photométriques

— *Définitions des unités photométriques* (P.V., 20, p. 119)

RÉSOLUTION (3)

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.

* Définition modifiée en 1967 (voir page 36 : 13^e CGPM, Résolution 5).

unités
mécaniques
et électriques

— *Définitions des unités électriques* (P.V., 20, p. 131)

RÉSOLUTION 2 (4)

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.

(3) Les deux définitions contenues dans cette Résolution ont été ratifiées par la 9^e CGPM (1948) qui a en outre approuvé le nom de *candela* donné à la « bougie nouvelle » (C.R., p. 54). Pour le lumen, le qualificatif « nouveau » a été abandonné par la suite.

(4) Les définitions contenues dans cette Résolution 2 ont été approuvées par la 9^e CGPM (1948) (C.R., p. 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.

9^e CGPM, 1948

échelle
thermodynamique
unité de
quantité de chaleur

— Point triple de l'eau; échelle thermodynamique à un seul point fixe; unité de quantité de chaleur (joule) (C.R., p. 55 et p. 63)

RÉSOLUTION 3⁽⁵⁾

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.

⁽⁵⁾ Les trois propositions contenues dans cette Résolution 3 ont été adoptées par la Conférence Générale.

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.

Remarque. — 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.⁽⁶⁾

degré Celsius — *Adoption de « degré Celsius »*

Entre les trois termes (« degré centigrade », « degré centésimal », « degré Celsius ») proposés pour désigner le degré de température, le CIPM a choisi « degré Celsius » (P.V., 21, 1948, p. 88).

Ce terme est également adopté par la Conférence Générale (C.R., p. 64).

système pratique
d'unités de mesure

— *Proposition d'établissement d'un système pratique d'unités de mesure* (C.R., p. 64)

RÉSOLUTION 6

La Conférence Générale,

considérant

que le Comité International des Poids et Mesures a été saisi d'une demande de l'Union Internationale de Physique le sollicitant d'adopter pour les relations internationales un système pratique international d'unités, recommandant le système MKS et une unité électrique du système pratique absolu, tout en ne recommandant pas que le système CGS soit abandonné par les physiciens;

qu'elle-même a reçu du Gouvernement français une demande analogue, accompagnée d'un projet destiné à servir de base de discussion pour l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure;

charge le Comité International :

d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays (en offrant effectivement comme base le document français) et de la pousser activement;

de centraliser les réponses;

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

⁽⁶⁾ Une table, établie conformément à cette demande, a été approuvée et publiée par le CIPM en 1950 (P.V., 22, p. 92).

symboles
et nombres

— Écriture des symboles d'unités et des nombres (C.R., p. 70)

RÉSOLUTION 7

Principes

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

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

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

I. Les symboles dont les unités sont précédées d'un point sont ceux qui avaient déjà été antérieurement adoptés par une décision du Comité International.

II. 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.

III. 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 ». ****

* Voir page 37 la Résolution 7 de la 13^e CGPM (1967).

** Un second symbole, L, a été adopté en 1979 (voir page 42 : 16^e CGPM, Résolution 6).

*** Nom et symbole changés en 1967 (voir page 35 : 13^e CGPM, Résolution 3).

**** Décision abrogée en 1967 (voir page 35 : 13^e CGPM, Résolution 3).

10^e CGPM, 1954

échelle
thermodynamique

— Définition de l'échelle thermodynamique de température (C.R., p. 79)

RÉSOLUTION 3

La Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures décide de définir l'échelle thermodynamique de température au moyen du point triple de l'eau comme point fixe fondamental, en lui attribuant la température 273,16 degrés Kelvin, exactement (?).

(?) Voir page 36 la Résolution 4 de la 13^e CGPM, 1967, qui définit explicitement le kelvin.

atmosphère normale

— Définition de l'atmosphère normale (C.R., p. 79)

RÉSOLUTION 4

La Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures, ayant constaté que la définition de l'atmosphère normale donnée par la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures dans la définition de l'Échelle Internationale de Température a laissé penser à quelques physiciens que la validité de cette définition de l'atmosphère normale était limitée aux besoins de la thermométrie de précision,

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

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

système pratique d'unités

— Système pratique d'unités (C.R., p. 80)

RÉSOLUTION 6

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

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

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

* Nom changé en « kelvin » en 1967 (voir page 35 : 13^e CGPM, Résolution 3).

CIPM, 1956

seconde — Définition de l'unité de temps (P.V., 25, p. 77) *

RÉSOLUTION 1

En vertu des pouvoirs que lui a conférés la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures par sa Résolution 5,

le Comité International des Poids et Mesures,

considérant

1^o que la Neuvième Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale (Dublin, 1955) a émis un avis favorable au rattachement de la seconde à l'année tropique ;

2° que, selon les décisions de la Huitième Assemblée Générale de l'Union Astronomique Internationale (Rome, 1952), la seconde de temps des éphémérides (T.E.) est la fraction $\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9}$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 h T.E.,

décide

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides »*.

* Définition abrogée en 1967 (voir page 35 : 13° CGPM, Résolution 1).

SI — *Système International d'Unités* (P.V., 25, p. 83)

RÉSOLUTION 3

Le Comité International des Poids et Mesures,

considérant

la mission dont l'a chargé la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures par sa Résolution 6 concernant l'établissement d'un système pratique d'unités de mesure susceptible d'être adopté par tous les pays signataires de la Convention du Mètre,

l'ensemble des documents envoyés par les vingt et un pays qui ont répondu à l'enquête prescrite par la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures,

la Résolution 6 de la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures fixant le choix des unités de base du système à établir,

recommande

1° que soit désigné comme « Système International d'Unités », le système fondé sur les unités de base adoptées par la Dixième Conférence Générale, qui sont :

[Suit la liste des six unités de base avec leur symbole, reproduite dans la Résolution 12 de la 11° CGPM (1960)].

2° que soient employés 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° CGPM (1960)].

11° CGPM, 1960

mètre — *Définition du mètre* (C.R., p. 85)*

RÉSOLUTION 6

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que le Prototype international ne définit pas le mètre avec une précision suffisante pour les besoins actuels de la métrologie,

qu'il est d'autre part désirable d'adopter un étalon naturel et indestructible,

décide

1° Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86.*

2° La définition du mètre en vigueur depuis 1889, fondée sur le Prototype international en platine iridié, est abrogée.

3° Le Prototype international du mètre sanctionné par la Première Conférence Générale des Poids et Mesures en 1889 sera conservé au Bureau International des Poids et Mesures dans les mêmes conditions que celles qui ont été fixées en 1889.

* Définition abrogée en 1983 (voir page 43 : 17^e CGPM, Résolution 1).

seconde — *Définition de l'unité de temps* (C.R., p. 86) *

RÉSOLUTION 9

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

le pouvoir donné par la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures au Comité International des Poids et Mesures de prendre une décision au sujet de la définition de l'unité fondamentale de temps,

la décision prise par le Comité International des Poids et Mesures dans sa session de 1956,

ratifie la définition suivante :

« La seconde est la fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ de l'année tropique pour 1900 janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides ». *

* Définition abrogée en 1967 (voir page 35 : 13^e CGPM, Résolution 1).

SI — *Système International d'Unités* (C.R., p. 87)

RÉSOLUTION 12

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

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

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

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

décide

1° le système fondé sur les six unités de base ci-dessus est désigné sous le nom de « Système International d'Unités »; **

2° l'abréviation internationale du nom de ce Système est : SI;

3° les noms des multiples et sous-multiples des unités sont formés au moyen des préfixes suivants : ***

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

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

UNITÉS SUPPLÉMENTAIRES

angle	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

UNITÉS DÉRIVÉES ****

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

* Nom et symbole de l'unité modifiés en 1967 (voir page 35 : 13^e CGPM, Résolution 3).

** Une septième unité de base, la mole, a été adoptée en 1971 par la 14^e CGPM (Résolution 3, voir page 39).

*** Voir pages 34 et 40 les quatre nouveaux préfixes adoptés par les 12^e CGPM (1964), Résolution 8 et 15^e CGPM (1975), Résolution 10.

**** Voir page 36 les autres unités ajoutées par la 13^e CGPM (1967), Résolution 6.

décimètre cube
et litre

— *Décimètre cube et litre* (C.R., p. 88)

RÉSOLUTION 13

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

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

invite le Comité International des Poids et Mesures à mettre ce problème à l'étude et à présenter ses conclusions à la Douzième Conférence Générale.

CIPM, 1961

— *Décimètre cube et litre* (P.V., 29, p. 34)

RECOMMANDATION

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

12^e CGPM, 1964

étalon
de fréquence

— *Étalon atomique de fréquence* (C.R., p. 93)

RÉSOLUTION 5

La Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures a constaté dans sa Résolution 10 l'urgence pour les buts de la haute métrologie d'arriver à un étalon atomique ou moléculaire d'intervalle de temps,

que, malgré les résultats acquis dans l'utilisation des étalons atomiques de fréquence à césium, le moment n'est pas encore venu pour la Conférence Générale d'adopter une nouvelle définition de la seconde, unité de base du Système International d'Unités, en raison des progrès nouveaux et importants qui peuvent être obtenus à la suite des études en cours,

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

habilite le Comité International des Poids et Mesures à désigner les étalons atomiques ou moléculaires de fréquence à employer temporairement,

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

DÉCLARATION DU CIPM (1964) (P.V., 32, p. 26 et C.R., p. 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.

litre — *Litre* (C.R., p. 93)

RÉSOLUTION 6

La Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant la Résolution 13 adoptée par la Onzième Conférence Générale en 1960 et la Recommandation adoptée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1961,

1° *abroge* la définition du litre donnée en 1901 par la Troisième Conférence Générale des Poids et Mesures,

2° *déclare* que le mot « litre » peut être utilisé comme un nom spécial donné au décimètre cube,

3° *recommande* que le nom de litre ne soit pas utilisé pour exprimer les résultats des mesures de volume de haute précision.

curie — *Curie* (C.R., p. 94)

RÉSOLUTION 7

La Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

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

* En 1975, le nom « becquerel » (Bq) a été adopté pour l'unité SI d'activité (voir page 40 : 15^e CGPM, Résolution 8); 1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

femto
atto — *Préfixes SI femto et atto* (C.R., p. 94)

RÉSOLUTION 8

La Douzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

13^e CGPM, 1967-1968

seconde — *Unité SI de temps (seconde)* (C.R., p. 103)

RÉSOLUTION 1

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que la définition de la seconde décidée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1956 (Résolution 1) et ratifiée par la Résolution 9 de la Onzième Conférence Générale (1960), puis maintenue par la Résolution 5 de la Douzième Conférence Générale (1964) ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie,

qu'à sa session de 1964 le Comité International des Poids et Mesures, habilité par la Résolution 5 de la Douzième Conférence (1964), a désigné pour répondre à ces besoins un étalon atomique de fréquence à césium à employer temporairement,

que cet étalon de fréquence est maintenant suffisamment éprouvé et suffisamment précis pour servir à une définition de la seconde répondant aux besoins actuels,

que le moment est venu de remplacer la définition actuellement en vigueur de l'unité de temps du Système International d'Unités par une définition atomique fondée sur cet étalon,

décide

1° L'unité de temps du Système International d'Unités est la seconde définie dans les termes suivants :

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

2° La Résolution 1 adoptée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1956 et la Résolution 9 de la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures sont abrogées.

kelvin
(degré Celsius)

— *Unité SI de température thermodynamique (kelvin)* (C.R., p. 104)

RÉSOLUTION 3

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

les noms « degré Kelvin » et « degré », les symboles « °K » et « deg » et leurs règles d'emploi contenus dans la Résolution 7 de la Neuvième Conférence Générale (1948), dans la Résolution 12 de la Onzième Conférence Générale (1960) et la décision prise par le Comité International des Poids et Mesures en 1962 (*Procès-Verbaux*, 30, p. 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. *

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

kelvin

RÉSOLUTION 4

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

décide d'exprimer cette définition de la façon suivante :

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

candela — *Unité SI d'intensité lumineuse (candela) (C.R., p. 104) **

RÉSOLUTION 5

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

la définition de l'unité d'intensité lumineuse ratifiée par la Neuvième Conférence Générale (1948) et contenue dans la « Résolution concernant le changement des unités photométriques » adoptée par le Comité International des Poids et Mesures en 1946 (*Procès-Verbaux*, 20, p. 119) en vertu des pouvoirs conférés par la Huitième Conférence Générale (1933),

que cette définition fixe bien la grandeur de l'unité d'intensité lumineuse mais prête à des critiques d'ordre rédactionnel,

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

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

* Définition abrogée en 1979 (voir page 41 : 16^e CGPM, Résolution 3).

unités SI dérivées — *Unités SI dérivées (C.R., p. 105)*

RÉSOLUTION 6

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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} *

* L'unité d'activité a reçu un nom et un symbole spéciaux en 1975 (voir page 40 : 15^e CGPM, Résolution 8).

**micron (μ)
bougie nouvelle**

— *Abrogation de décisions antérieures (micron, bougie nouvelle) (C.R., p. 105)*

RÉSOLUTION 7

La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

1^o le nom d'unité « micron », et le symbole « μ » qui fut attribué à cette unité et qui est devenu un préfixe;

2^o le nom d'unité « bougie nouvelle ».

CIPM, 1967

**multiples
du kilogramme**

— *Multiples et sous-multiples décimaux de l'unité de masse (P.V., 35, p. 29)*

RECOMMANDATION 2

Le Comité International des Poids et Mesures,

considérant que la règle de formation des noms des multiples et sous-multiples décimaux des unités du paragraphe 3^o 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 ».

CIPM, 1969

SI — *Système International d'Unités : modalités d'application de la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960) (P.V., 37, p. 30)*

RECOMMANDATION 1 (1969)

Le Comité International des Poids et Mesures,

considérant que la Résolution 12 de la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures (1960) concernant le Système International d'Unités, a suscité des discussions sur certaines dénominations,

déclare

1° les unités de base, les unités supplémentaires et les unités dérivées du Système International d'Unités, qui forment un ensemble cohérent, sont désignées sous le nom d'« unités SI »;

2° les préfixes adoptés par la Conférence Générale pour la formation des multiples et sous-multiples décimaux des unités SI sont appelés « préfixes SI »;
et *recommande*

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

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

* Voir page 42 la Recommandation 1 (CI-1980) du CIPM.

14^e CGPM, 1971

**pascal
siemens** — *Pascal; siemens*

La 14^e CGPM (C.R., p. 59) 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).

TAI — *Temps Atomique International; rôle du CIPM* (C.R., p. 77)

RÉSOLUTION 1

La Quatorzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que la seconde, unité de temps du Système International d'Unités, est définie depuis 1967 d'après une fréquence atomique naturelle, et non plus d'après des échelles de temps fournies par des mouvements astronomiques,

que le besoin d'une échelle de Temps Atomique International (TAI) est une conséquence de la définition atomique de la seconde,

que plusieurs organisations internationales ont assuré et assurent encore avec succès l'établissement des échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques, particulièrement grâce aux services permanents du Bureau International de l'Heure (BIH),

que le Bureau International de l'Heure a commencé à établir une échelle de temps atomique dont les qualités sont reconnues et qui a prouvé son utilité,

que les étalons atomiques de fréquence servant à la réalisation de la seconde ont été considérés et doivent continuer de l'être par le Comité International des Poids et Mesures assisté d'un Comité Consultatif, et que l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International doit être la seconde réalisée conformément à sa définition atomique,

que toutes les organisations scientifiques internationales compétentes et les laboratoires nationaux actifs dans ce domaine ont exprimé le désir que le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures donnent une définition du Temps Atomique International, et contribuent à l'établissement de l'échelle de Temps Atomique International,

que l'utilité du Temps Atomique International nécessite une coordination étroite avec les échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques,

demande au Comité International des Poids et Mesures

1° de donner une définition du Temps Atomique International⁽⁸⁾;

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.

mole — *Unité SI de quantité de matière (mole)* (C.R., p. 78)

RÉSOLUTION 3

La Quatorzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant les avis de l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée, de l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée et de l'Organisation Internationale de Normalisation concernant le besoin de définir une unité de quantité de matière,
décide

1° La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes * dans 0,012 kilogramme de carbone 12; son symbole est « mol ».

2° Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

3° La mole est une unité de base du Système International d'Unités.

* A sa session de 1980, le CIPM a approuvé le rapport de la 7^e session du CCU (1980) précisant que « dans cette définition, il est entendu que l'on se réfère à des atomes de carbone 12 non liés, au repos et dans leur état fondamental ».

15^e CGPM, 1975

— *Valeur recommandée* (C.R., p. 103)

**vitesse
de la lumière**

RÉSOLUTION 2

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

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

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

(⁸) Voir page 50.

UTC — *Temps Universel Coordonné* (C.R., p. 104)

RÉSOLUTION 5

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

estime que cet emploi est parfaitement recommandable.

becquerel
gray — *Unités SI pour les rayonnements ionisants* (C.R., p. 105)

RÉSOLUTIONS 8 ET 9

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

— en raison de l'urgence, exprimée par la Commission Internationale des Unités et Mesures de Rayonnements (ICRU), d'étendre l'usage du Système International d'Unités aux recherches et aux applications de la radiologie,

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

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

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

le *becquerel*, symbole Bq, égal à la seconde à la puissance moins un.

} Résolution 8

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

le *gray*, symbole Gy, égal au joule par kilogramme.

} Résolution 9

Note. — Le gray est l'unité SI de dose absorbée. Dans le domaine des rayonnements ionisants, le gray peut encore être employé avec d'autres grandeurs physiques qui s'expriment aussi en joules par kilogramme; le Comité Consultatif des Unités est chargé d'étudier cette question en collaboration avec les organisations internationales compétentes⁽⁹⁾.

peta
exa — *Préfixes SI peta et exa* (C.R., p. 106)

RÉSOLUTION 10

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

Facteur par lequel l'unité est multipliée	Préfixe	Symbole
10 ¹⁵	peta	P
10 ¹⁸	exa	E

⁽⁹⁾ A sa session de 1976, le CIPM 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.

16^e CGPM, 1979

candela — *Unité SI d'intensité lumineuse (candela)* (C.R., p. 100)

RÉSOLUTION 3

La Seizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

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

que les techniques radiométriques se développent rapidement, autorisant des précisions qui sont déjà analogues à celles de la photométrie et que ces techniques sont déjà en usage dans des laboratoires nationaux pour réaliser la candela sans avoir à construire un corps noir,

que la relation entre les grandeurs lumineuses de la photométrie et les grandeurs énergétiques, à savoir la valeur 683 lumens par watt pour l'efficacité lumineuse spectrale de la radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz, a été adoptée par le Comité International des Poids et Mesures en 1977,

que cette valeur a été reconnue suffisamment exacte pour le système des grandeurs lumineuses photopiques, qu'elle n'entraîne qu'un changement d'environ 3 % pour le système des grandeurs lumineuses scotopiques et que par conséquent elle assure une continuité satisfaisante,

que le moment est venu de donner à la candela une définition susceptible d'améliorer la facilité d'établissement des étalons photométriques et leur précision, et qui s'applique aux grandeurs photopiques et scotopiques de la photométrie et aux grandeurs à définir dans le domaine mésopique,

décide

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

2. La définition de la candela (à l'époque appelée bougie nouvelle) décidée par le Comité International des Poids et Mesures en 1946 en vertu des pouvoirs conférés par la 8^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) en 1933, ratifiée par la 9^e CGPM en 1948, puis amendée par la 13^e CGPM en 1967, est abrogée.

sievert — *Nom spécial pour l'unité SI d'équivalent de dose* (C.R., p. 100)

RÉSOLUTION 5

La Seizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

l'effort fait pour introduire les unités SI dans le domaine des rayonnements ionisants, les risques que peuvent encourir des êtres humains soumis à des irradiations sous-estimées, risques qui pourraient résulter de la confusion entre dose absorbée et équivalent de dose,

que la prolifération des noms spéciaux représente un danger pour le Système International d'Unités et doit être évitée dans toute la mesure du possible, mais que cette règle peut être transgressée lorsqu'il s'agit de sauvegarder la santé humaine,

adopte le nom spécial *sievert*, symbole Sv, pour l'unité SI d'équivalent de dose dans le domaine de la radioprotection. Le sievert est égal au joule par kilogramme ⁽¹⁰⁾.

litre — *Symboles du litre* (C.R., p. 101)

RÉSOLUTION 6

La Seizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

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 ⁽¹¹⁾.

CIPM, 1980

unités SI
supplémentaires

— *Unités SI supplémentaires (radian et stéradian)* (P.V., 48, p. 24)

RECOMMANDATION 1 (CI-1980)

Le Comité International des Poids et Mesures,

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,

⁽¹⁰⁾ A sa session de 1984, le CIPM a décidé d'accompagner cette Résolution de l'explication suivante (voir Recommandation 1 (CI-1984), p. 44) :

« 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 . »

⁽¹¹⁾ Le CIPM, lors de sa 79^e session (1990), a estimé encore prématuré de faire un choix définitif.

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 Comité International des Poids et Mesures (CIPM) en 1969 pour la classe des unités supplémentaires introduite dans la Résolution 12 de la 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1960 laisse la liberté de traiter le radian et le stéradian comme unités de base dans le Système International,
- qu'une telle possibilité compromet la cohérence interne du Système International fondé sur sept unités de base seulement,

décide d'interpréter la classe des unités supplémentaires dans le Système International comme une classe d'unités dérivées sans dimension pour lesquelles la Conférence Générale des Poids et Mesures laisse la liberté de les utiliser ou non dans les expressions des unités dérivées du Système International.

17^e CGPM, 1983

mètre — *Définition du mètre* (C.R., p. 97)

RÉSOLUTION 1

La Dix-septième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que la définition actuelle ne permet pas une réalisation du mètre suffisamment précise pour tous les besoins,

que les progrès réalisés dans l'asservissement des lasers permettent d'obtenir des radiations plus reproductibles et plus faciles à utiliser que la radiation étalon émise par une lampe à krypton 86,

que les progrès réalisés dans la mesure des fréquences et des longueurs d'onde de ces radiations ont abouti à des déterminations concordantes de la vitesse de la lumière dont l'exactitude est limitée principalement par la réalisation du mètre dans sa définition actuelle.

que les valeurs des longueurs d'onde déterminées à partir de mesures de fréquence et d'une valeur donnée de la vitesse de la lumière ont une précision supérieure à celle qui peut être obtenue par comparaison avec la longueur d'onde de la radiation étalon du krypton 86,

qu'il y a avantage, notamment pour l'astronomie et la géodésie, à maintenir inchangée la valeur de la vitesse de la lumière recommandée en 1975 par la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures, dans sa Résolution 2 ($c = 299\,792\,458$ m/s),

qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour effet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à la valeur recommandée, et que cela n'introduit aucune discontinuité appréciable de l'unité de

longueur, compte tenu de l'incertitude relative * de $\pm 4 \times 10^{-9}$ des meilleures réalisations du mètre dans sa définition actuelle.

que ces diverses formes, faisant appel soit au trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps spécifié, soit à la longueur d'onde d'une radiation de fréquence mesurée ou de fréquence spécifiée, ont fait l'objet de consultations et de discussions approfondies, qu'elles ont été reconnues équivalentes et qu'un consensus s'est dégagé en faveur de la première forme,

que le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre est dès maintenant en mesure de donner des instructions pour la mise en pratique d'une telle définition, instructions qui pourront inclure l'emploi de la radiation orangée du krypton 86 utilisée jusqu'ici comme étalon et qui pourront être complétées ou révisées par la suite,

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.

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

mètre — *Sur la mise en pratique de la définition du mètre* (C.R., p. 98)

RÉSOLUTION 2

La Dix-septième Conférence Générale des Poids et Mesures,

invite le Comité International des Poids et Mesures

à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre ⁽¹⁾,

à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,

à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons.

CIPM, 1984

gray
sievert — *Au sujet du sievert* (P.V., 52, p. 31)

RECOMMANDATION 1 (CI-1984)

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 CGPM (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

⁽¹⁾ Voir Annexe II, p. 46, la Recommandation 1 (CI-1983) adoptée par le CIPM en 1983.

(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 .

CIPM, 1990

zetta, zepto — *Préfixes SI zetta, zepto, yotta et yocto* ⁽¹³⁾
yotta, yocto

PROJET DE RÉSOLUTION D PRÉSENTÉ A LA 19^e CGPM

La 19^e Conférence Générale des Poids et Mesures,

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 Conférence Générale des Poids et Mesures (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

⁽¹³⁾ 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.

ANNEXE II

Mise en pratique des définitions des principales unités

1. Longueur

Le CIPM a adopté en 1983 la Recommandation 1 (CI-1983) suivante qui précise les règles de mise en pratique de la définition du mètre :

Le Comité International des Poids et Mesures,

recommande

— 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 $l = c \cdot t$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c = 299\,792\,458$ 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 $\lambda = c/f$ et la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide $c = 299\,792\,458$ m/s;

c) au moyen de l'une des radiations de la liste ci-dessous, radiations pour lesquelles on peut utiliser la valeur donnée de la longueur d'onde dans le vide ou de la fréquence, avec l'incertitude indiquée, pourvu que l'on observe les conditions spécifiées et le mode opératoire reconnu comme approprié;

— et que dans tous les cas les corrections nécessaires soient appliquées pour tenir compte des conditions réelles telles que diffraction, gravitation ou imperfection du vide.

LISTE DES RADIATIONS RECOMMANDÉES, 1983

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

1. — Radiations de lasers asservis sur des raies d'absorption saturée *

1.1. — Molécule absorbante CH_4 , transition ν_3 , P(7), composante $F_2^{(2)}$.

Les valeurs $f = 88\,376\,181\,608$ kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,0$ fm

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 1,3 \times 10^{-10}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de $0,44 \times 10^{-10}$ en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à

He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à méthane, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées dans la cellule :

- pression du méthane ≤ 3 Pa,
- puissance surfacique moyenne sur l'axe transportée par les faisceaux, dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité ** $\leq 10^4$ W/m²,
- 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 ≤ 5 %.

1.2. — Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 17-1, P(62), composante o.

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs } f &= 520\,206\,808,51 \text{ MHz} \\ \lambda &= 576\,294\,760,27 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude globale relative estimée *** de $\pm 6 \times 10^{-10}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de 2×10^{-10} en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à colorant (ou à la radiation émise par un laser à He-Ne et doublée en fréquence) asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

1.3. — Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 11-5, R(127), composante i.

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs } f &= 473\,612\,214,8 \text{ MHz} \\ \lambda &= 632\,991\,398,1 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 1 \times 10^{-9}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de $3,4 \times 10^{-10}$ en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à iode intérieure au laser, lorsque les conditions suivantes sont respectées :

- température des parois de la cellule comprise entre 16°C et 50°C avec un point froid à $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,
- puissance moyenne transportée par les faisceaux dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité ** $15 \text{ mW} \pm 10 \text{ mW}$,
- modulation de la fréquence, amplitude de crête à creux $6 \text{ MHz} \pm 1 \text{ MHz}$.

1.4. — Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 9-2, R(47), composante o.

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs } f &= 489\,880\,355,1 \text{ MHz} \\ \lambda &= 611\,970\,769,8 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 1,1 \times 10^{-9}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de $3,7 \times 10^{-10}$ en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à He-Ne asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

1.5. — Molécule absorbante $^{127}\text{I}_2$, transition 43-0, P(13), composante a₃ (quelquefois dénommée composante s).

$$\begin{aligned} \text{Les valeurs } f &= 582\,490\,603,6 \text{ MHz} \\ \lambda &= 514\,673\,466,2 \text{ fm} \end{aligned}$$

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 1,3 \times 10^{-9}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de $4,3 \times 10^{-10}$ en valeur relative] s'appliquent à la radiation émise par un laser à Ar⁺ asservi à l'aide d'une cellule à iode, située à l'intérieur ou à l'extérieur du laser, ayant un point froid à la température de $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Notes

* 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. Des détails sur les méthodes d'asservissement sont décrits dans de nombreuses publications scientifiques ou techniques. Des exemples de conditions expérimentales considérées comme convenables sont décrits, pour telle ou telle radiation, dans des publications dont les références peuvent être obtenues auprès des laboratoires membres du CCDM ou auprès du BIPM.

** La puissance transportée par les faisceaux, dans un seul sens, à l'intérieur de la cavité, est obtenue en divisant la puissance de sortie par le facteur de transmission du miroir de sortie.

*** Cette incertitude, de même que les valeurs de f et de λ , est fondée sur la moyenne pondérée de deux déterminations seulement. Cependant, la plus précise de ces deux déterminations a été obtenue exclusivement par multiplication et mélange de fréquences à partir de la radiation précédente (paragraphe 1.1).

2. — Radiations de lampes spectrales

2.1. — Radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de ^{86}Kr .

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

avec une incertitude globale relative estimée de $\pm 4 \times 10^{-9}$ [qui résulte d'un écart-type estimé de $1,3 \times 10^{-9}$ en valeur relative] s'applique à la radiation émise par une lampe utilisée dans les conditions recommandées par le CIPM (*Procès-Verbaux CIPM*, 49^e session, 1960, pp. 71-72 et *Comptes Rendus 11^e CGPM*, 1960, p. 85).

2.2. — Les radiations des atomes de ^{86}Kr , ^{198}Hg et ^{114}Cd recommandées par le CIPM en 1963 (*Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, 3^e session, 1962, pp. 18-19 et *Procès-Verbaux CIPM*, 52^e session, 1963, pp. 26-27) avec les valeurs indiquées pour leur longueur d'onde et pour l'incertitude correspondante.

2. Masse

L'unité de masse, le kilogramme, est la masse du prototype international du kilogramme conservé au BIPM. La masse des étalons secondaires du kilogramme en platine iridié ou en acier inoxydable est comparée à la masse d'un prototype à l'aide de balances dont la précision peut atteindre 1×10^{-8} . Dans le cas d'étalons en acier inoxydable, l'exactitude de la comparaison dépend de l'exactitude avec laquelle la correction due à la poussée de l'air peut être connue.

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

3. Temps

Unité de temps, fréquence

Quelques laboratoires de recherche construisent eux-mêmes l'appareillage pour produire 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. On obtient ainsi la seconde et des impulsions à la fréquence voulue, 1 Hz, 1 kHz, etc. Pour les meilleures installations actuelles, on estime que l'incertitude obtenue est de quelques 10^{-14} pour des moyennes qui s'étendent sur des périodes comprises entre quelques heures et quelques jours. On trouve aussi dans le commerce des étalons de temps à césium qui ont des incertitudes d'environ 3×10^{-12} .

A côté des étalons à césium, il existe des horloges et des générateurs de fréquence très stables, comme le maser à hydrogène et les horloges à quartz ou à rubidium. Leur fréquence doit être étalonnée par comparaison à un étalon de temps à césium, soit directement, soit par l'intermédiaire d'émissions hertziennes. Certaines de ces émissions fournissent des signaux dont la fréquence est connue avec une incertitude (écart-type) allant de 1×10^{-11} à 5×10^{-13} . Ces émissions couvrent toute la surface de la Terre, mais leur réception est parfois difficile à cause des irrégularités de propagation. Lorsqu'il est nécessaire d'avoir une exactitude supérieure, il est préférable de procéder à des comparaisons d'horloges, comme il est expliqué ci-après.

Échelles de temps

Quelques-uns des étalons à césium construits par les laboratoires de recherche fonctionnent sans interruption comme étalons de temps. D'autre part, de nombreux services horaires nationaux exploitent des étalons à césium commerciaux, en service continu, étalons qui sont conservés dans des conditions d'environnement soigneusement contrôlées. Depuis 1969 il est possible de comparer ces différents instruments, sur des distances intercontinentales, avec des incertitudes réduites à quelques centaines de nanosecondes. Il a donc été possible d'établir une échelle de temps atomique moyenne offrant des garanties de pérennité suffisantes pour qu'elle serve de référence temporelle mondiale. Cette échelle, approuvée par la Résolution 1 de la 14^e CGPM en 1971, a reçu le nom de Temps Atomique International (TAI) ⁽¹⁾. Grâce au système de satellites « Global Positioning System » (GPS) le TAI est maintenant accessible dans le monde entier à une vingtaine de nanosecondes près.

Le TAI n'est pas diffusé de façon directe. Les signaux de temps diffusés par radio sont donnés dans une échelle de temps appelée Temps Universel Coordonné (UTC) selon la recommandation de la 15^e CGPM (Résolution 5) en 1975. L'UTC est défini de telle façon qu'il diffère du Temps Atomique International (TAI) d'un nombre entier de secondes. La différence UTC - TAI a été fixée égale à - 10 s le 1^{er} janvier 1972, date de mise en application de la réforme de l'UTC qui comportait auparavant un décalage de fréquence ; cette différence peut être modifiée de 1 seconde par l'emploi d'une *seconde intercalaire* (« leap second ») positive ou négative à la fin d'un mois de l'UTC, de préférence en premier lieu à la fin de décembre ou de juin et en second lieu à la fin de mars ou de septembre, afin que l'UTC reste en accord avec le temps défini par la rotation de la Terre avec une approximation meilleure que 0,9 s ⁽²⁾. 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 horaires 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 microsecondes.

La précision et l'exactitude des mesures de temps conduisent parfois à devoir tenir compte des effets de la relativité. La définition de la seconde doit être comprise comme la définition de l'unité de temps propre, c'est-à-dire qu'en toute rigueur l'utilisateur doit se trouver au voisinage de l'horloge et au repos par rapport à celle-ci. En général, dans l'étendue d'un laboratoire, seuls les effets de la relativité restreinte ont de l'importance, si l'horloge est dans ce laboratoire. Mais, pour des applications mettant en jeu des horloges distantes les unes des autres, il peut être nécessaire de prendre en compte la relativité générale. En particulier, le TAI est fondé sur un réseau mondial

⁽¹⁾ Voir à la page 50 la définition du TAI donnée par le CIPM à la demande de la 14^e CGPM (1971, Résolution 1).

⁽²⁾ Au 1^{er} janvier 1991 la différence UTC - TAI est égale à - 26 s.

d'horloges et sa définition * a été complétée comme suit (déclaration du CCDS, *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 9, 1980 p. S 15) :

« 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 ».

Pour toutes les horloges fixes par rapport à la Terre et situées au niveau de la mer, l'unité d'échelle du TAI a une durée égale à celle de l'unité de temps telle qu'elle est réalisée localement, mais, par exemple, pour une horloge située à 2 000 m d'altitude l'unité d'échelle du TAI paraît être plus longue de $2,2 \times 10^{-13}$ s. Dans les liaisons horaires à grande distance qui passent par des satellites géostationnaires, l'effet relativiste peut atteindre quelques centaines de nanosecondes.

L'unité d'échelle du TAI (et de l'UTC) est conforme à sa définition à 2 ou 3×10^{-14} s près sur des moyennes de 10 ou 20 jours. Le TAI et l'échelle de temps d'une horloge locale peuvent être comparés à l'aide des signaux émis par les satellites du GPS et l'on peut déterminer ainsi la fréquence de l'horloge locale à 2 ou 3×10^{-14} près.

* Cette définition, approuvée par le Comité International à sa 59^e session (octobre 1970), est la suivante :

« 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. »

4. Grandeurs électriques

La réalisation de l'ampère (unité de base du SI), de l'ohm ou du volt, 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 avec le watt tel qu'il est réalisé de façon mécanique. L'expérience utilise une bobine dans un champ magnétique de telle façon qu'il n'est nécessaire de connaître ni les dimensions de la bobine ni la valeur du champ 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 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.

Ajustement prévu des représentations du volt et de l'ohm

RÉSOLUTION 6

La Dix-huitième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

— que l'uniformité mondiale et la constance à long terme des représentations nationales des unités électriques sont d'une importance majeure pour la science, le commerce et l'industrie du point de vue technique comme du point de vue économique,

— que de nombreux laboratoires nationaux utilisent l'effet Josephson et commencent à utiliser l'effet Hall quantique pour conserver respectivement des représentations du volt et de l'ohm qui donnent les meilleures garanties de stabilité à long terme,

— qu'en raison de l'importance de la cohérence entre les unités de mesure des diverses grandeurs physiques les valeurs attribuées à ces représentations doivent être autant que possible en accord avec le SI,

— que l'ensemble des résultats des expériences en cours ou récemment achevées permettra d'établir une valeur acceptable, suffisamment compatible avec le SI, pour le coefficient qui relie chacun de ces effets à l'unité électrique correspondante,

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

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

En 1988, le CIPM a adopté les Recommandations 1 (CI-1988), et 2 (CI-1988) suivantes :

Représentation du volt au moyen de l'effet Josephson

RECOMMANDATION 1 (CI-1988)

Le Comité International des Poids et Mesures,

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

considérant

— qu'une étude approfondie des résultats des déterminations les plus récentes conduit à une valeur de 483 597,9 GHz/V pour la constante de Josephson, K_J , c'est-à-dire pour le quotient de la fréquence par la tension correspondant au palier de rang $n = 1$ dans l'effet Josephson,

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

recommande

— que l'on adopte, par convention, pour la constante de Josephson, K_J , la valeur $K_{J-90} = 483\,597,9$ GHz/V exactement,

— que cette nouvelle valeur soit utilisée à partir du 1^{er} janvier 1990, et non auparavant, pour remplacer les valeurs actuellement en usage,

— que cette nouvelle valeur soit utilisée à partir de cette même date par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Josephson leurs mesures de force électromotrice,

— qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec cette nouvelle valeur,

estime

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

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

Représentation de l'ohm au moyen de l'effet Hall quantique

RECOMMANDATION 2 (CI-1988)

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 $25\,812,807\ \Omega$ pour la constante de von Klitzing, R_K , c'est-à-dire pour le quotient de la tension de Hall par le courant correspondant au plateau de rang $i = 1$ dans l'effet Hall quantique,

— que l'effet Hall quantique, avec cette valeur de R_K , peut être utilisé pour établir un étalon de référence de résistance dont l'incertitude (écart-type), par rapport à l'ohm, est estimée 2×10^{-7} en valeur relative et dont la reproductibilité est nettement meilleure,

recommande

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

— que cette valeur soit utilisée à partir du 1^{er} janvier 1990, et non auparavant, par tous les laboratoires qui fondent sur l'effet Hall quantique leurs mesures de résistance électrique,

— qu'à partir de cette même date tous les autres laboratoires ajustent la valeur de leurs étalons de référence pour la mettre en accord avec R_{K-90} ,

— que, pour établir un étalon de référence de résistance électrique fondé sur l'effet Hall quantique, les laboratoires suivent les conseils pour la mise en 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 très 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 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 CIPM lors de sa 78^e session en 1988.

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. Parmi les thermomètres primaires qui ont été utilisés pour obtenir des valeurs exactes de la température thermodynamique il y a 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 1 ou 2 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 CGPM 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).

Échelle Internationale de Température de 1990

RECOMMANDATION 5 (CI-1989)

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 (BIPM) 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 définie 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. Elle comporte une série de points fixes de définition et des méthodes d'interpolation à utiliser entre ces points. Ces 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. Dans plusieurs domaines de température plusieurs définitions de la température T_{90} définie par l'échelle coexistent. Les différentes définitions sont également valables.

Des conseils pour réaliser et mettre en œuvre l'EIT-90 sont donnés dans les deux documents « Supplementary Information for the ITS-90 » et « Techniques for Approximating the ITS-90 » 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 moles, c'est-à-dire en unités de quantité de matière des entités élémentaires. Le principe des mesures physiques fondées sur la définition de 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 kilogramme 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⁽³⁾. La masse

⁽³⁾ On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer ce rapport; la méthode la plus directe est l'emploi d'un spectromètre de masse.

correspondant à 1 mole de X est alors $[m(X)/m(^{12}\text{C})] \times 0,012$ kg, ce que l'on exprime en disant que la masse molaire $M(X)$ de X (quotient de la masse par la quantité de matière) est :

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

Par exemple, l'atome de fluor ^{19}F et l'atome de carbone ^{12}C ont des masses qui sont dans le rapport 18,9984/12. La masse molaire du gaz moléculaire F_2 est :

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

La quantité de matière correspondant à une masse donnée du gaz F_2 , 0,05 kg par exemple, est :

$$\frac{0,05 \text{ kg}}{0,037\,996\,8 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}} = 1,315\,90 \text{ mol.}$$

Dans le cas d'un corps pur que l'on considère comme formé de molécules B, qui sont des combinaisons d'atome X, Y, ... selon la formule chimique $\text{B} = \text{X}_\alpha\text{Y}_\beta \dots$, la masse d'une molécule est $m(\text{B}) = \alpha m(\text{X}) + \beta m(\text{Y}) + \dots$.

Cette masse n'est pas connue avec exactitude, mais le rapport $m(\text{B})/m(^{12}\text{C})$ peut être déterminé avec exactitude. La masse molaire d'un corps moléculaire B est alors :

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

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

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

Il existe d'autres méthodes, fondées sur les lois de la physique et de la physicochimie, pour mesurer les quantités de matière; en voici trois exemples.

Dans le cas des gaz parfaits, 1 mole de particules d'un gaz quelconque occupe le même volume à une température T et à une pression p (environ $0,022\,4 \text{ m}^3$ à $T = 273,16 \text{ K}$ 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).

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 mole de Ag et $\frac{1}{2}$ mole de Cu sont déposées sur une cathode par la même quantité d'électricité (environ $96\,487 \text{ C}$).

L'application des lois de Raoult est encore une méthode de mesure des rapports des quantités de matière en solution étendue dans un solvant.

7. Grandeurs photométriques

La méthode approuvée en 1937 par le Comité International des Poids et Mesures (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **18**, p. 237) pour déterminer les valeurs des grandeurs photométriques des sources lumineuses dont le rayonnement n'a pas la même composition spectrale, consiste à utiliser un procédé tenant compte des « efficacités

lumineuses relatives spectrales » $V(\lambda)$. Par sa Recommandation 1 (CI-1972), le CIPM recommande d'employer les valeurs de $V(\lambda)$ adoptées en 1971 par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (4). La fonction de pondération $V(\lambda)$ a été obtenue en vision photopique, c'est-à-dire pour des rétines adaptées à la lumière. Pour des rétines adaptées à l'obscurité, on obtient une autre fonction $V'(\lambda)$ qui exprime l'efficacité lumineuse relative spectrale en vision scotopique (CIE, 1951); cette fonction $V'(\lambda)$ a été sanctionnée par le CIPM en septembre 1976.

Les grandeurs photométriques se trouvent ainsi définies d'une manière purement physique comme des grandeurs proportionnelles à la somme ou à l'intégrale d'une répartition spectrale d'énergie pondérée selon une fonction spécifiée de la longueur d'onde.

Avant 1979, on mesurait les valeurs des lampes étalons utilisées couramment par comparaison à la luminance du radiateur de Planck (corps noir) à la température de congélation du platine. Depuis la nouvelle définition de la candela adoptée en 1979, cette mesure s'effectue par comparaison au rayonnement monochromatique spécifié dans cette définition, ou à d'autres rayonnements en tenant compte de $V(\lambda)$ ou de $V'(\lambda)$.

Les lampes étalons sont des lampes à incandescence, alimentées par un courant électrique continu spécifié, qui fournissent soit un flux lumineux connu, soit, dans une direction donnée, une intensité lumineuse connue.

(4) Publications CIE N° 18 (1970), p. 43, et N° 15 (1971), p. 93; *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 40, 1972, Annexe 1. Les valeurs de $V(\lambda)$ [= $\bar{y}(\lambda)$] sont données à des longueurs d'onde échelonnées de 1 nm entre 360 et 830 nm; elles sont un perfectionnement des valeurs de 10 en 10 nm adoptées en 1933 par le CIPM et antérieurement en 1924 par la CIE.

INDEX

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

- accélération due à la pesanteur (g_n), 24
ampère, **10**, 26
atmosphère normale, **29**
- becquerel, 40
bougie nouvelle, 25, 37
Bureau International des Poids
et Mesures (BIPM), 3-4
- candela, **11**, 36, 41
Comité International des Poids
et Mesures (CIPM), 3-4
Comités Consultatifs, 4
Conférence Générale des Poids et Mesures
(CGPM), 3
Convention du Mètre, 3
coulomb, **26**
curie, 34
- décimètre cube, 33
définition des unités, mise en pratique
des, 46-56
degré Celsius, 10, 27, 35
- échelle thermodynamique à un seul point
fixe (point triple de l'eau), 26, 28
étalon de fréquence (^{133}Cs), 33
- farad, **26**
fréquence, étalon de, 33, 48
- g_n , 24
grandeurs
électriques, 50
photométriques, 55
système de, 8
gray, 40, 44
- henry, **26**
- joule, **26**, 26-27
- kelvin, **10**, 35, 36
kilogramme, **9**, 18, 23, 24, 37, 48
- législations sur les unités, 8
litre, 24, 33, 34 ; symboles, 42
longueur, 46
lumen, **25**
- masse, 48
masse et poids, 24
mètre, **9**, 23, 25, 30, 43, 46
micron, 37
mise en pratique des définitions des
principales unités, 46-56
mole, **10**, 39, 54
multiples du kilogramme, 18, 37
- newton, 25
nombres, écriture des, 28
- ohm, **26**
- pascal, 38
poids (*voir* à masse)
préfixes SI, 8, 17, 32, 34, 40, 45
règles d'emploi, 17
- quantité de matière, 54
- radian, 15
- seconde, **9**, 29, 31, 35
siemens, 38
sievert, 41, 44
stéradian, 15
- symboles
écriture et emploi des, 16, 28
litre, 42
unités de base, 12
unités dérivées ayant des noms spé-
ciaux, 13
- système
de grandeurs, 8
international d'unités (SI), 30, 31 ;
(adoption), 37
pratique d'unités de mesure, proposi-
tion d'établissement d'un, 27, 29

TAI, 38, 49
température, 53
 Celsius, 10
 thermodynamique, 10, 35
temps, 48
 atomique international, 38, 49
 universel coordonné, 40, 49

unités
 CGS ayant des noms spéciaux, 21
 électriques, 26
 en usage avec le SI, 19
 généralement déconseillées, 22
 législations sur les, 8
 maintenues temporairement, 20
 photométriques, 25
 de quantité de chaleur (joule), 26

unités SI
 les 3 classes, 7
 de base, 9 ; symboles, 12
 dérivées, 12-15, 32, 36
 ayant des noms spéciaux, 13
 multiples et sous-multiples des, 8, 17
 supplémentaires, 15, 32, 42
UTC, 40, 49

vitesse de la lumière (valeur recommandée), 39
volt, **26**

watt, **26**
weber, **26**

*The International System
of Units
(SI)*

6th Edition

1991

THE BIPM AND THE CONVENTION DU MÈTRE

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

The BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m²) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government ; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre*.

The task of the BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements ; it is responsible for :

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes ;
- carrying out comparisons of national and international standards ;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques ;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

The BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for :

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system ;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope ;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of the BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State ; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of the BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

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

(¹) In March 1991, forty-six States were members of this Convention : Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, Germany, Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep.), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

Some forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report in Procès-Verbaux des séances du Comité International gives the details of the work in progress.

In view of the extension of the work entrusted to the BIPM, the CIPM has set up since 1927, under the name of Comités Consultatifs, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These Comités Consultatifs, which may form temporary or permanent Working Groups to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the Comité International accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the Conférence Générale.

The Comités Consultatifs have common regulations (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p. 97). Each Comité Consultatif, the chairman of which is normally a member of the CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by the CIPM, as well as individual members also appointed by the CIPM and one representative of the BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence:

1. The Comité Consultatif d'Électricité (CCE), set up in 1927.
2. The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), new name given in 1971 to the Comité Consultatif de Photométrie set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The Comité Consultatif de Thermométrie (CCT), which for a time was called Comité Consultatif de Thermométrie et Calorimétrie (CCTC), set up in 1937.
4. The Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM), set up in 1952.
5. The Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), set up in 1956.
6. The Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI), set up in 1958. In 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of X and γ rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV (α -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The Comité Consultatif des Unités (CCU), set up in 1964 (this committee replaced the « Commission du Système d'Unités » set up by the CIPM in 1954).
8. The Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), set up in 1980.

The proceedings of the Conférence Générale, the Comité International, the Comités Consultatifs, and the Bureau International are published under the auspices of the latter in the following series:

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

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

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of the CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions and recommendations of the various bodies created under the Convention du Mètre.

The International System of Units *

CONTENTS

	Pages	
	English	French
THE BIPM AND THE CONVENTION DU MÈTRE	63	3
PREFACE TO THE 6TH EDITION	66	6
I. <i>Introduction</i>	67	7
I.1. Historical note	67	7
I.2. Three classes of SI units	67	7
I.3. SI prefixes	68	8
I.4. System of quantities	68	8
I.5. Legislation on units	68	8
II. <i>SI units</i>	69	9
II.1. SI base units	69	9
II.1.1. Definitions	69	9
II.1.2. Symbols	72	12
II.2. SI derived units	72	12
II.3. SI supplementary units	75	15
II.4. Rules for writing and using SI unit symbols	76	16
III. <i>Decimal multiples and sub-multiples of SI units</i>	77	17
III.1. SI prefixes	77	17
III.2. Rules for using SI prefixes	77	17
III.3. The kilogram	78	18
IV. <i>Units outside the International System</i>	79	19
IV.1. Units used with the International System	79	19
IV.2. Units in use temporarily	80	20
IV.3. CGS units	81	21
IV.4. Other units	82	22
APPENDIX I. — Decisions of the CGPM and the CIPM	83	23
APPENDIX II. — Practical realization of the definitions of some important units	106	46
INDEX	117	57

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

PREFACE
TO THE 6th EDITION

Since 1970, the Bureau International des Poids et Mesures, (BIPM) has regularly published this document containing Resolutions and Recommendations of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) and the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) on the International System of Units. Explanations have been added as well as relevant extracts from the International Standards of the International Organization for Standardization (ISO) for the practical use of the system.

The Comité Consultatif des Unités (CCU) of the CIPM helped to draft the document and has approved the final text.

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

Appendix II outlines the measurements, consistent with the theoretical definitions given here, which metrological laboratories can make to realize the units and to calibrate highest-quality material standards. Unless otherwise specified, uncertainties are given at the level of one standard deviation.

The 6th edition is a revision of the 5th edition (1985); it takes into consideration the decisions of the 18th CGPM (1987) and of the CIPM (1988, 1989, 1990), and the amendments made by the CCU (1990).

The early editions of this document have been used as a work of reference in numerous countries. In order to make the contents more readily accessible for a greater number of readers, the CIPM has decided to include an English-language translation. The BIPM has endeavoured to publish the most faithful translation possible through collaboration with the National Physical Laboratory (Teddington, United Kingdom) and the National Institute of Standards and Technology (Gaithersburg, USA). A particular difficulty arises from the slight spelling variations that occur in the scientific language of the English-speaking countries (for instance, « metre » and « meter », « litre » and « liter »). In general, translation follows the Recommendations of ISO (1982) as far as the vocabulary and the spelling of the names of quantities and units are concerned, as well as the writing of numbers. This English translation is not to be considered as an official text. In case of dispute, it is always the French text which is authoritative.

February 1991

T. J. QUINN
Director, BIPM

J. DE BOER
President, CCU



I. INTRODUCTION

I.1. Historical note

In 1948 the 9th CGPM, by its Resolution 6, instructed the CIPM :

«to study the establishment of a complete set of rules for units of measurement »;

«to find out for this purpose, by official enquiry, the opinion prevailing in scientific, technical and educational circles in all countries » and

«to make recommendations on the establishment of a *practical system of units of measurement* suitable for adoption by all signatories to the Metre Convention ».

The same General Conference also laid down, by its Resolution 7, general principles for unit symbols and also gave a list of units with special names.

The 10th CGPM (1954), by its Resolution 6, and the 14th CGPM (1971), by its Resolution 3, adopted as base units of this « practical system of units », the units of the following seven quantities : length, mass, time, electric current, thermodynamic temperature, amount of substance and luminous intensity.

The 11th CGPM (1960), by its Resolution 12, adopted the name *International System of Units*, with the international abbreviation SI, for this practical system of units of measurement and laid down rules for the prefixes, the derived and supplementary units and other matters, thus establishing a comprehensive specification for units of measurement.

I.2. The three classes of SI units

SI units are divided into three classes :

base units, derived units and supplementary units.

From the scientific point of view, division of SI units into these three classes is to a certain extent arbitrary, because it is not essential to the physics of the subject.

Nevertheless, the General Conference, considering the advantages of a single, practical, worldwide system of units for international relations, for teaching and for scientific work, decided to base the International System on a choice of seven well-defined units which by convention are regarded as dimensionally independent : the metre, the kilogram, the second, the ampere, the kelvin, the mole, and the candela (*see* II.1, page 69). These SI units are called *base units*.

The second class of SI units contains *derived units*, i.e., units that can be formed by combining base units according to the algebraic relations linking the corresponding quantities. The names and symbols of some units thus formed in terms of base units can be replaced by special names and symbols which can themselves be used to form expressions and symbols of other derived units (*see* II.2, page 72).

The 11th CGPM (1960) admitted a third class of SI units, called *supplementary units* and containing the SI units of plane and solid angle (see II.3, page 75).

The SI units of these three classes form a coherent set of units in the sense normally attributed to the word « coherent »; i.e., a system of units mutually related by rules of multiplication and division without any numerical factor. Following CIPM Recommendation 1 (1969), the units of this coherent set of units are designated by the name *SI units*.

It is important to emphasize that each physical quantity has only one SI unit, even if the name of this unit can be expressed in different forms, but the inverse is not true: the same SI unit name can correspond to several different quantities (see page 74).

I.3. The SI prefixes

The General Conference has adopted a series of prefixes to be used in forming the decimal multiples and submultiples of SI units (see III.1, page 77). Following CIPM Recommendation 1 (1969), the set of prefixes is designated by the name *SI prefixes*.

The multiples and submultiples of SI units, which are formed by using the SI prefixes, should be designated by their complete name *multiples and submultiples of SI units* in order to make a distinction between them and the coherent set of SI units proper.

I.4. System of quantities

This book does not deal with the system of quantities used with the SI units, an area handled by Technical Committee 12 of the *International Organization for Standardization (ISO)* which since 1955 has published a series of International Standards on quantities and their units and which strongly recommends the use of the International System of Units ⁽¹⁾.

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

I.5. Legislation on units

Countries have established through legislation rules concerning the use of units on a national basis, either for general use or for specific areas such as commerce, health or public safety, education, etc. In a growing number of countries this legislation is based on the use of the International System of Units.

The *International Organization of Legal Metrology (OIML)*, founded in 1955, is concerned with the international harmonization of this legislation.

⁽¹⁾ ISO 31, in « Units of measurement » (ISO Standards Handbook 2, 2nd edition), ISO, Geneva, 1982, pp. 19-238.

II. SI UNITS

II.1. SI base units

II.1.1. Definitions

- a) **unit of length (metre)** The definition of the metre based upon the international prototype of platinum-iridium in force since 1889, had been replaced by the 11th CGPM (1960) by a definition based upon the wavelength of a krypton-86 radiation. In order to increase the precision of realization of the metre, the 17th CGPM (1983) replaced this latter definition by the following :

The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/299\,792\,458$ of a second (17th CGPM (1983), Resolution 1).

The old international prototype of the metre which was sanctioned by the 1st CGPM in 1889 is still kept at the BIPM under the conditions specified in 1889.

- b) **unit of mass (kilogram)** The 1st CGPM (1889) sanctioned the international prototype of the kilogram and declared : *this prototype shall henceforth be considered to be the unit of mass.*

The 3rd CGPM (1901), in a declaration intended to end the ambiguity which existed as to the meaning of the word « weight » in popular usage, confirmed that *the kilogram is the unit of mass : it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram (see the complete declaration, page 84).*

This international prototype, made of platinum-iridium, is kept at the BIPM under conditions specified by the 1st CGPM in 1889.

- c) **unit of time (second)** The unit of time, the second, was defined originally as the fraction $1/86\,400$ of the mean solar day. The exact definition of « mean solar day » was left to astronomers, but their measurements have shown that on account of irregularities in the rotation of the Earth the mean solar day does not guarantee the desired accuracy. In order to define the unit of time more precisely the 11th CGPM (1960) adopted a definition given by the International Astronomical Union which was based on the tropical year. Experimental work had, however, already shown that an atomic standard of time-interval, based on a transition between two energy levels of an atom or a molecule, could be realized and reproduced much more accurately. Considering that a very precise definition of the unit of time of the International System, the second, is indispensable for the needs of advanced metrology, the 13th CGPM (1967) decided to replace the definition of the second by the following :

The second is the duration of $9\,192\,631\,770$ periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium-133 atom (13th CGPM (1967), Resolution 1).

d) unit of electric current (ampere)

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

Although it was already obvious on the occasion of the 8th CGPM (1933) that there was a unanimous desire to replace those « international » units by so-called « absolute » units, the official decision to abolish them was only taken by the 9th CGPM (1948), which adopted for the unit of electric current, the ampere, the following definition :

The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} newton per metre of length (CIPM (1946), Resolution 2 approved by the 9th CGPM, 1948).

The expression « MKS unit of force » which occurs in the original text has been replaced here by « newton », a name adopted for this unit by the 9th CGPM (1948, Resolution 7).

e) unit of thermodynamic temperature (kelvin)

The definition of the unit of thermodynamic temperature was given in substance by the 10th CGPM (1954, Resolution 3) which selected the triple point of water as fundamental fixed point and assigned to it the temperature 273,16 K by definition. The 13th CGPM (1967, Resolution 3) adopted the name *kelvin* (symbol K) instead of « degree Kelvin » (symbol °K) and in its Resolution 4 defined the unit of thermodynamic temperature as follows :

The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction 1/273,16 of the thermodynamic temperature of the triple point of water (13th CGPM (1967), Resolution 4).

The 13th CGPM (1967, Resolution 3) also decided that the unit kelvin and its symbol K should be used to express an interval or a difference of temperature.

Note. — In addition to the thermodynamic temperature (symbol T), expressed in kelvins, use is also made of Celsius temperature (symbol t) defined by the equation

$$t = T - T_0$$

where $T_0 = 273,15$ K by definition. To express Celsius temperature, the unit « degree Celsius » which is equal to the unit « kelvin » is used; in this case, « degree Celsius » is a special name used in place of « kelvin ». An interval or difference of Celsius temperature can, however, be expressed in kelvins as well as in degrees Celsius.

f) unit of amount of substance (mole)

Since the discovery of the fundamental laws of chemistry, units of amount of substance called, for instance, « gram-atom » and « gram-molecule », have been used to specify amounts of chemical elements or compounds. These units had a direct connection with « atomic weights » and « molecular weights », which were in fact relative masses. « Atomic weights » were originally referred to the atomic weight of oxygen (by general agreement taken as 16). But whereas physicists

separated isotopes in the mass spectrograph and attributed the value 16 to one of the isotopes of oxygen, chemists attributed that same value to the (slightly variable) mixture of isotopes 16, 17 and 18 which was for them the naturally occurring element oxygen. Finally, an agreement between the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) brought this duality to an end in 1959/60. Physicists and chemists have ever since agreed to assign the value 12 to the isotope 12 of carbon. The unified scale thus obtained gives values of « relative atomic mass ».

It remained to define the unit of amount of substance by fixing the corresponding mass of carbon 12; by international agreement this mass has been fixed at 0,012 kg, and the unit of the quantity « amount of substance » ⁽²⁾ has been given the name *mole* (symbol mol).

Following proposals of IUPAP, IUPAC and ISO, the CIPM gave in 1967, and confirmed in 1969, a definition of the mole, eventually adopted by the 14th CGPM (1971, Resolution 3) :

1. *The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0,012 kilogram of carbon 12.*
2. *When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.*

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

Note that this definition specifies at the same time the nature of the quantity whose unit is the mole.

**g) unit of
luminous
intensity
(candela)**

The units of luminous intensity based on flame or incandescent filament standards in use in various countries before 1948 were replaced initially by the « new candle » based on the luminance of a Planckian radiator (a black body) at the temperature of freezing platinum. This decision had been prepared by the International Commission on Illumination (CIE) and by the CIPM before 1937, and was promulgated by the CIPM in 1946, and then ratified in 1948 by the 9th CGPM which adopted a new international name for this unit, the *candela* (symbol cd); in 1967 the 13th CGPM gave an amended version of the 1946 definition.

Because of the experimental difficulties in realizing a Planck radiator at high temperatures and the new possibilities offered by radiometry, i.e., the measurement of optical radiation power, the 16th CGPM adopted in 1979 the following new definition :

The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of (1/683) watt per steradian (16th CGPM (1979), Resolution 3).

⁽²⁾ The name of this quantity, adopted by IUPAP, IUPAC and ISO, is in French « quantité de matière », and in English « amount of substance »; the German and Russian translations are « Stoffmenge » and « количество вещества ». The French name recalls « quantitas materiae » by which in the past the quantity now called « mass » used to be known; we must forget this old meaning, for mass and amount of substance are entirely different quantities.

II.1.2. Symbols

The base units of the International System are collected in Table 1 with their names and their symbols (10th CGPM (1954), Resolution 6; 11th CGPM (1960), Resolution 12; 13th CGPM (1967), Resolution 3; 14th CGPM (1971), Resolution 3).

TABLE 1
SI base units

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

* Translators' note. « Quantity » is the technical word for measurable attributes of phenomena or matter.

II.2. SI derived units

Derived units are expressed algebraically in terms of base units by means of the mathematical symbols of multiplication and division (*see* Table 2 for some examples).

TABLE 2
Examples of SI derived units expressed in terms of base units

Quantity	SI unit	
	Name	Symbol
area	square metre	m ²
volume	cubic metre	m ³
speed, velocity	metre per second	m/s
acceleration	metre per second squared	m/s ²
wave number	reciprocal metre	m ⁻¹
density, mass density	kilogram per cubic metre	kg/m ³
specific volume	cubic metre per kilogram	m ³ /kg
current density	ampere per square metre	A/m ²
magnetic field strength	ampere per metre	A/m
concentration (of amount of substance)	mole per cubic metre	mol/m ³
luminance	candela per square metre	cd/m ²

Certain derived units have been given special names and symbols. These names and symbols are given in Tables 3 and 3 bis; they may themselves be used to express other derived units (*see* Table 4 for some examples).

In Tables 3, 3 bis, 4 and 5, the final column gives expressions for the SI units concerned in terms of SI base units. In this column, factors such as m^0 , kg^0 , etc. that are equal to 1 are not generally shown explicitly.

TABLE 3
SI derived units with special names

Quantity	SI unit			
	Name	Symbol	Expression in terms of other units	Expression in terms of SI base units
frequency	hertz	Hz		s^{-1}
force	newton	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
pressure, stress	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
energy, work, quantity of heat	joule	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
power, radiant flux	watt	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
electric charge, quantity of electricity	coulomb	C		$s \cdot A$
electric potential, potential difference, electromotive force	volt	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
capacitance	farad	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
electric resistance	ohm	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
electric conductance	siemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
magnetic flux	weber	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
magnetic flux density	tesla	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
inductance	henry	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Celsius temperature ^(a)	degree Celsius	$^{\circ}C$		K
luminous flux	lumen	lm		$cd \cdot sr$ ^(b)
illuminance	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$ ^(b)

^(a) See page 70, e, Note.

^(b) In photometry, the symbol sr is maintained in expressions for units (see II.3., p. 75).

TABLE 3 bis
SI derived units with special names admitted for reasons of safeguarding human health

Quantity	SI unit			
	Name	Symbol	Expression in terms of other units	Expression in terms of SI base units
activity (of a radionuclide)	becquerel	Bq		s^{-1}
absorbed dose, specific energy imparted, kerma, absorbed dose index	gray	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
dose equivalent, dose equivalent index	sievert	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

TABLE 4

Examples of SI derived units expressed by means of special names

Quantity	SI unit		
	Name	Symbol	Expression in terms of SI base units
dynamic viscosity	pascal second	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
moment of force	newton metre	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
surface tension	newton per metre	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
heat flux density, irradiance	watt per square metre	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
heat capacity, entropy . . .	joule per kelvin	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
specific heat capacity, specific entropy	joule per kilogram kelvin	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
specific energy	joule per kilogram	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
energy density	joule per cubic metre	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
electric field strength	volt per metre	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
electric charge density	coulomb per cubic metre	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
electric flux density	coulomb per square metre	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
permittivity	farad per metre	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
permeability	henry per metre	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
molar energy	joule per mole	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
molar entropy, molar heat capacity	joule per mole kelvin	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
exposure (X and γ rays).	coulomb per kilo- gram	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
absorbed dose rate	gray per second	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$

A single SI unit name may correspond to several different quantities, as has been mentioned in paragraph I.2 (p. 68). In the above tables, where the list of quantities is not exhaustive, one finds several examples. Thus the joule per kelvin (J/K) is the SI unit for the quantity heat capacity as well as for the quantity entropy; also the ampere (A) is the SI unit for the base quantity electric current as well as for the derived quantity magnetomotive force. The name of the unit is thus not sufficient to define the quantity measured; in particular, measuring instruments should indicate not only the unit but also the measured quantity concerned.

A derived unit can often be expressed in several different ways by using names of base units and special names of derived units : for example, in place of joule one may write newton metre or even kilogram metre squared per second squared. However, this algebraic freedom is governed by common-sense physical considerations.

In practice, with certain quantities one gives preference to using certain special unit names, or certain combinations of units, in order to facilitate the distinction between quantities having the same dimension. For example, one designates the SI unit of frequency as the hertz rather than the reciprocal second, and one designates the SI unit of moment of force as the newton metre rather than the joule.

In the field of ionizing radiation, in the same way one designates the SI unit of activity as the becquerel rather than the reciprocal second and the SI units of absorbed dose and dose equivalent as gray and sievert, respectively, rather than the joule per kilogram ⁽³⁾.

Note : Quantities expressed as pure numbers. — Certain so-called dimensionless quantities, as for example refractive index, relative permeability, or friction factor, are defined as the ratio of two comparable quantities. Such quantities have a dimensional product — or dimension — equal to 1 and are therefore expressed by pure numbers. The coherent SI unit is then the ratio of two identical SI units and may be expressed by the number 1.

II.3. SI supplementary units

This class contains two units : the SI unit of plane angle, the *radian*, and the SI unit of solid angle, the *steradian* (11th CGPM (1960), Resolution 12).

Considering that plane angle is generally expressed as the ratio between two lengths and solid angle as the ratio between an area and the square of a length, and in order to maintain the internal coherence of the International System based on only seven base units, the CIPM (1980) specified that, in the International System, the supplementary units radian and steradian are dimensionless derived units. This implies that the quantities plane angle and solid angle are considered as dimensionless derived quantities.

TABLE 5
SI supplementary units

Quantity	SI unit		
	Name	Symbol	Expression in terms of SI base units
plane angle	radian	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
solid angle	steradian	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$

These supplementary units may be used in expressions for derived units to facilitate distinguishing between quantities of different nature but the same dimension. Some examples of the use of supplementary units in forming derived units are given in Table 6.

⁽³⁾ See page 104 Recommendation 1 (CI-1984) adopted by the CIPM.

TABLE 6
Examples of SI derived units formed by using supplementary units

Quantity	SI unit	
	Name	Symbol
angular velocity	radian per second	rad/s
angular acceleration	radian per second squared	rad/s ²
radiant intensity	watt per steradian	W/sr
radiance	watt per square metre steradian	W/(m ² · sr)

II.4. Rules for writing and using SI unit symbols

The general principles concerning writing the unit symbols were adopted by the 9th CGPM (1948, Resolution 7) :

1. Roman (upright) type, in general lower case, is used for the unit symbols. If, however, the name of the unit is derived from a proper name, the first letter of the symbol is in upper case.
2. Unit symbols are unaltered in the plural.
3. Unit symbols are not followed by a period.

To insure uniformity in the use of the SI unit symbols, ISO International Standards give certain recommendations. Following these recommendations :

a) The product of two or more units may be indicated in either of the following ways,

$$\text{for example : } N \cdot m \text{ or } N m$$

b) A solidus (oblique stroke, /), a horizontal line, or negative exponents may be used to express a derived unit formed from two others by division,

$$\text{for example : } m/s, \frac{m}{s} \text{ or } m \cdot s^{-1}$$

c) The solidus must not be repeated on the same line unless ambiguity is avoided by parentheses. In complicated cases negative exponents or parentheses should be used,

$$\text{for example : } \left\{ \begin{array}{l} m/s^2 \text{ or } m \cdot s^{-2} \\ m \cdot kg/(s^3 \cdot A) \text{ or } m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} \end{array} \right. \text{ but not : } m/s/s \text{ or } m \cdot kg/s^3/A$$

III. DECIMAL MULTIPLES AND SUB-MULTIPLES OF SI UNITS

III.1. SI Prefixes

The 11th CGPM (1960, Resolution 12) adopted a first series of prefixes and symbols of prefixes to form the names and symbols of the decimal multiples and sub-multiples of SI units. Prefixes for 10^{-15} and 10^{-18} were added by the 12th CGPM (1964, Resolution 8), and those for 10^{15} and 10^{18} by the 15th CGPM (1975, Resolution 10), those for 10^{21} , 10^{24} , 10^{-21} and 10^{-24} were proposed by the CIPM (1990) for approval by the 19th CGPM (1991).

TABLE 7
SI Prefixes

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

III.2. Rules for using SI prefixes

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

1. Prefix symbols are printed in roman (upright) type without spacing between the prefix symbol and the unit symbol.

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

for example :

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

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

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

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

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

for example : 1 nm *but not :* 1 m μ m

4. A prefix should never be used alone

for example : $10^6/\text{m}^3$ *but not :* M/ m^3

III.3. The kilogram

Among the base units of the International System, the unit of mass is the only one whose name, for historical reasons, contains a prefix. Names of decimal multiples and sub-multiples of the unit of mass are formed by attaching prefixes to the word « gram » (CIPM (1967), Recommendation 2),

for example : 10^{-6} kg = 1 milligram (1 mg)
but not 1 microkilogram (1 μ kg).

IV. UNITS OUTSIDE THE INTERNATIONAL SYSTEM

IV.1. Units used with the International System

The CIPM (1969) recognized that users of SI will also wish to employ with it certain units not part of it, but which are important and are widely used. These units are given in Table 8. The combination of units of this table with SI units to form compound units should be restricted to special cases in order not to lose the advantages of the coherence of SI units.

TABLE 8
Units in use with the International System

Name	Symbol	Value in SI units
minute	min	1 min = 60 s
hour ^(a)	h	1 h = 60 min = 3 600 s
day	d	1 d = 24 h = 86 400 s
degree	°	1° = (π/180) rad
minute	'	1' = (1/60)° = (π/10 800) rad
second	"	1" = (1/60)' = (π/648 000) rad
litre ^(b)	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonne ^(c) *	t	1 t = 10 ³ kg

^(a) The symbol of this unit is included in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948).

^(b) This unit and the symbol l were adopted by CIPM in 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41). The alternative symbol, L, was adopted by the 16th CGPM (1979, Resolution 6) in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1. The present definition of the litre is given in Resolution 6 of the 12th CGPM (1964).

^(c) This unit and its symbol were adopted by the International Committee in 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41).

* In some English-speaking countries this unit is called « metric ton ».

It is likewise necessary to recognize, outside the International System, some other units that are useful in specialized fields, because their values expressed in SI units must be obtained by experiment, and are therefore not known exactly (Table 9).

TABLE 9
*Units used with the International System,
whose values in SI units are obtained experimentally ^(a)*

Name	Symbol	Definition
electronvolt	eV	^(b)
unified atomic mass unit	u	^(c)

^(a) 1 eV = 1,602 177 33 (49) × 10⁻¹⁹ J,
1 u = 1,660 540 2 (10) × 10⁻²⁷ kg.

Values from *CODATA Bulletin*, No. 63, 1986; the uncertainty of the last two figures, at the level of one standard deviation, is shown in parentheses.

^(b) The electronvolt is the kinetic energy acquired by an electron in passing through a potential difference of 1 volt in vacuum.

^(c) The unified atomic mass unit is equal to (1/12) of the mass of an atom of the nuclide ¹²C.

IV.2. Units in use temporarily

In view of existing practice in certain fields or countries, the CIPM (1978) considered that it was acceptable for those units listed in Table 10 to continue to be used with SI units, until the CIPM considers their use no longer necessary. However, these units should not be introduced where they are not used at present.

TABLE 10
Units in use temporarily with the International System

Name	Symbol	Value in SI units
nautical mile ^(a)		1 nautical mile = 1 852 m
knot		1 nautical mile per hour = (1 852/3 600) m/s
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
are ^(b)	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare ^(b)	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
barn ^(c)	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²
bar ^(d)	bar	1 bar = 0,1 MPa = 100 kPa = 1 000 hPa = 10 ⁵ Pa
gal ^(e)	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
curie ^(f)	Ci	1 Ci = 3,7 × 10 ¹⁰ Bq
röntgen ^(g)	R	1 R = 2,58 × 10 ⁻⁴ C/kg
rad ^(h)	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
rem ⁽ⁱ⁾	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv

^(a) The nautical mile is a special unit employed for marine and aerial navigation to express distances. The conventional value given above was adopted by the First International Extraordinary Hydrographic Conference, Monaco, 1929, under the name « International nautical mile ».

^(b) This unit and its symbol were adopted by the CIPM in 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41) and are used to express agrarian areas.

^(c) The barn is a special unit employed in nuclear physics to express effective cross-sections.

^(d) This unit and its symbol are included in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948).

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

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

^(g) The röntgen is a special unit employed to express exposure of X or γ radiations.

^(h) The rad is a special unit employed to express absorbed dose of ionizing radiations. When there is risk of confusion with the symbol for radian, rd may be used as the symbol for rad.

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

IV.3. CGS units

In the field of mechanics, the CGS system of units was based upon three base units: the centimetre, the gram and the second. In the field of electricity and magnetism, units were expressed in terms of these three base units; this led to the establishment of several different systems, for example the CGS Electrostatic System, the CGS Electromagnetic System and the CGS Gaussian System. In these three last-mentioned systems, the system of quantities and the corresponding system of equations are often different from those used with SI units.

The CIPM considers that it is in general preferable not to use, with the units of the International System, CGS units that have special names⁽⁴⁾. Such units are listed in Table 11.

TABLE 11
CGS units with special names

Name	Symbol	Value in SI units
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)	Gs,G	1 Gs corresponds to 10 ⁻⁴ T
oersted ^(b)	Oe	1 Oe corresponds to (1 000/4π) A/m
maxwell ^(b)	Mx	1 Mx corresponds to 10 ⁻⁸ Wb
stilb ^(a)	sb	1 sb = 1 cd/cm ² = 10 ⁴ cd/m ²
phot	ph	1 ph = 10 ⁴ lx

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

^(b) This unit is part of the so-called « electromagnetic » 3-dimensional CGS system and cannot strictly speaking be compared to the corresponding unit of the International System, which has four dimensions when only mechanical and electric quantities are considered.

⁽⁴⁾ The aim of the International System of Units and of the recommendations contained in this document is to secure a greater degree of uniformity, hence a better understanding of the general use of units. Nevertheless in certain specialized fields of scientific research, in particular in theoretical physics, there may sometimes be very good reasons for using other systems or other units.

Whichever units are used, it is important that the *symbols* employed for them follow current international recommendations.

IV.4. Other units

As regards units outside the International System which do not come under Sections IV.1, 2 and 3, the CIPM considers that it is in general preferable to avoid them, and to use instead units of the International System. Some of those units are listed in Table 12.

TABLE 12
Other units generally deprecated

Name	Value in SI units
fermi	1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m
metric carat ^(a)	1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg
torr	1 torr = (101 325/760) Pa
standard atmosphere (atm) ^(b)	1 atm = 101 325 Pa
kilogram-force (kgf)	1 kgf = 9,806 65 N
calorie (cal) ^(c)	
micron (μ) ^(d)	1 μ = 1 μ m = 10^{-6} m
X unit ^(e)	
stere (st) ^(f)	1 st = 1 m ³
gamma (γ)	1 γ = 1 nT = 10^{-9} T
γ ^(g)	1 γ = 1 μ g = 10^{-9} kg
λ ^(h)	1 λ = 1 μ l = 10^{-6} l = 10^{-9} m ³

^(a) This name was adopted by the 4th CGPM (1907, pp. 89-91) for commercial dealings in diamonds, pearls and precious stones.

^(b) Resolution 4 of the 10th CGPM (1954). The designation « standard atmosphere » for a reference pressure of 101 325 Pa is still acceptable.

^(c) Several « calories » have been in use:
 — a calorie labelled « at 15 °C »: 1 cal₁₅ = 4,185 5 J (value adopted by the CIPM in 1950 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 22, 1950, pp. 79-80));
 — a calorie labelled « IT » (International Table): 1 cal_{IT} = 4,186 8 J (5th International Conference on the Properties of Steam, London, 1956);
 — a calorie labelled « thermochemical » 1 cal_{th} = 4,184 J.

^(d) The name of this unit and its symbol, adopted by the CIPM in 1879 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41) and repeated in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948) were abolished by the 13th CGPM (1967, Resolution 7).

^(e) This special unit was employed to express wavelengths of X rays; 1 X unit = $1,002 \times 10^{-4}$ nm approximately.

^(f) This special unit employed to measure firewood was adopted by the CIPM in 1879 with the symbol « s » (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1879, p. 41). The 9th CGPM (1948, Resolution 7) changed the symbol to « st ».

^(g) This symbol is mentioned in *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1880, p. 56.

^(h) This symbol is mentioned in *BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 1880, p. 30.

APPENDIX I

Decisions of the CGPM and the CIPM

The more important decisions abrogated, modified, or added to are indicated by an asterisk (*). These references and the footnotes have been added by the BIPM to make understanding of the text easier.

CR : *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)*
PV : *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures (CIPM)*

1st CGPM, 1889

metre
kilogram

- *Sanction of the international prototypes of the metre and the kilogram (CR, pp. 34-38)*

The General Conference,

considering

the « *Compte rendu of the President of the CIPM* » and the « *Report of the CIPM* », which show that, by the collaboration of the French section of the international Metre Commission and of the CIPM, the fundamental measurements of the international and national prototypes of the metre and of the kilogram have been made with all the accuracy and reliability which the present state of science permits;

that the international and national prototypes of the metre and the kilogram are made of an alloy of platinum with 10 per cent iridium, to within 0,000 1;

the equality in length of the international Metre and the equality in mass of the international Kilogram with the length of the Metre and the mass of the Kilogram kept in the Archives of France;

that the differences between the national Metres and the international Metre lie within 0,01 millimetre and that these differences are based on a hydrogen thermometer scale which can always be reproduced thanks to the stability of hydrogen, provided identical conditions are secured;

that the differences between the national Kilograms and the international Kilogram lie within 1 milligram;

that the international Metre and Kilogram and the national Metres and Kilograms fulfil the requirements of the Metre Convention,

sanctions

A. As regards international prototypes :

1. The Prototype of the metre chosen by the CIPM.

This prototype, at the temperature of melting ice, shall henceforth represent the metric unit of length. *

2. The Prototype of the kilogram adopted by the CIPM.

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

3. The hydrogen thermometer centigrade scale in terms of which the equations of the prototype Metres have been established.

B. As regards national prototypes :

.....

* Definition abrogated in 1960 (see p.90 : 11th CGPM, Resolution 6).

3rd CGPM, 1901

litre — *Declaration concerning the definition of the litre (CR, p. 38) **

.....

* *The Conference declares :*

1. The unit of volume, for high accuracy determinations, is the volume occupied by a mass of 1 kilogram of pure water, at its maximum density and at standard atmospheric pressure : this volume is called « litre ». *

2.

* Definition abrogated in 1964 (see p. 94 : 12th CGPM, Resolution 6).

**mass
and weight
 g_n**

— *Declaration on the unit of mass and on the definition of weight; conventional value of g_n (CR, p. 70)*

Taking into account the decision of the CIPM of the 15 October 1887, according to which the kilogram has been defined as unit of mass ⁽¹⁾;

Taking into account the decision contained in the sanction of the prototypes of the Metric System, unanimously accepted by the CGPM on the 26 September 1889;

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

The Conference declares :

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

« 2. The word *weight* denotes a quantity of the same nature as a *force* : the weight of a body is the product of its mass and the acceleration due to gravity; in particular, the standard weight of a body is the product of its mass and the standard acceleration due to gravity;

« 3. The value adopted in the International Service of Weights and Measures for the standard acceleration due to gravity is $980,665 \text{ cm/s}^2$, value already stated in the laws of some countries » ⁽²⁾.

⁽¹⁾ « The mass of the international Kilogram is taken as the unit for the International Service of Weights and Measures » (PV, 1887, p. 88).

⁽²⁾ This conventional reference « standard value » ($g_n = 9,806 65 \text{ m/s}^2$) was confirmed in 1913 by the 5th CGPM (CR, p. 44). This value should be used for reduction to standard gravity of measurements made in any location on Earth.

7th CGPM, 1927

metre — *Definition of the metre by the international Prototype* (CR, p. 49) *

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

* Definition abrogated in 1960 (see p. 90: 11th CGPM, Resolution 6).

CIPM, 1946

photometric units — *Definitions of photometric units* (PV, 20, p. 119)

RESOLUTION (3)

.....

4. The photometric units may be defined as follows :

New candle (unit of luminous intensity). — The value of the new candle is such that the brightness of the full radiator at the temperature of solidification of platinum is 60 new candles per square centimetre. *

New lumen (unit of luminous flux). — The new lumen is the luminous flux emitted in unit solid angle (steradian) by a uniform point source having a luminous intensity of 1 new candle.

5.....

* Definition modified in 1967 (see p. 96: 13th CGPM, Resolution 5).

mechanical and electric units — *Definitions of electric units* (PV, 20, p. 131)

RESOLUTION 2 (4)

.....

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

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

(3) The two definitions contained in this Resolution were ratified by the 9th CGPM (1948), which also approved the name *candela* given to the « new candle » (CR, p. 54). For the lumen the qualifier « new » was later abandoned.

(4) The definitions contained in this Resolution 2 were approved by the 9th CGPM (1948), (CR, p. 49), which moreover adopted the name *newton* (Resolution 7) for the MKS unit of force.

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

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

(B) Definitions of electric units. The CIPM accepts the following propositions which define the theoretical value of the electric units :

Ampere (unit of electric current). — The ampere is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 metre apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} MKS unit of force (newton) per metre of length.

Volt (unit of potential difference and of electromotive force). — The volt is the potential difference between two points of a conducting wire carrying a constant current of 1 ampere, when the power dissipated between these points is equal to 1 watt.

Ohm (unit of electric resistance). — The ohm is the electric resistance between two points of a conductor when a constant potential difference of 1 volt, applied to these points, produces in the conductor a current of 1 ampere, the conductor not being the seat of any electromotive force.

Coulomb (unit of quantity of electricity). — The coulomb is the quantity of electricity carried in 1 second by a current of 1 ampere.

Farad (unit of capacitance). — The farad is the capacitance of a capacitor between the plates of which there appears a potential difference of 1 volt when it is charged by a quantity of electricity of 1 coulomb.

Henry (unit of electric inductance). — The henry is the inductance of a closed circuit in which an electromotive force of 1 volt is produced when the electric current in the circuit varies uniformly at the rate of 1 ampere per second.

Weber (unit of magnetic flux). — The weber is the magnetic flux which, linking a circuit of one turn, would produce in it an electromotive force of 1 volt if it were reduced to zero at a uniform rate in 1 second.

9th CGPM, 1948

thermodynamic
scale
unit of
quantity of heat

— *Triple point of water; thermodynamic scale with a single fixed point; unit of quantity of heat (joule)* (CR, pp. 55 and 63)

RESOLUTION 3⁽⁵⁾

1. With present-day techniques, the triple point of water is capable of providing a thermometric reference point with an accuracy higher than can be obtained from the melting point of ice.

In consequence the CCTC considers that the zero of the centesimal thermodynamic scale must be defined as the temperature 0,010 0 degree below that of the triple point of water.

(⁵) The three propositions contained in this Resolution 3 were adopted by the General Conference.

2. The CCTC accepts the principle of an absolute thermodynamic scale with a single fundamental fixed point, at present provided by the triple point of pure water, the absolute temperature of which will be fixed at a later date.

The introduction of this new scale does not affect in any way the use of the International Scale, which remains the recommended practical scale.

3. The unit of quantity of heat is the joule.

Note. — It is requested that the results of calorimetric experiments be as far as possible expressed in joules.

If the experiments are made by comparison with the rise of temperature of water (and that, for some reason, it is not possible to avoid using the calorie), the information necessary for conversion to joules must be provided.

The CIPM, advised by the CCTC, should prepare a table giving, in joules per degree, the most accurate values that can be obtained from experiments on the specific heat of water ⁽⁶⁾.

degree Celsius — *Adoption of « degree Celsius »*

From three names (« degree centigrade », « centesimal degree », « degree Celsius ») proposed to denote the degree of temperature, the CIPM has chosen « degree Celsius » (PV, 21, 1948, p. 88).

This name is also adopted by the General Conference (CR, p. 64).

practical system of units of measurement — *Proposal for establishing a practical system of units of measurement* (CR, p. 64)

RESOLUTION 6

The General Conference,

considering

that the CIPM has been requested by the International Union of Physics to adopt for international use a practical international system of units; that the International Union of Physics recommends the MKS system and one electric unit of the absolute practical system, but does not recommend that the CGS system be abandoned by physicists;

that the CGPM has itself received from the French Government a similar request, accompanied by a draft to be used as basis of discussion for the establishment of a complete specification of units of measurement;

instructs the CIPM :

to seek by an energetic, active, official enquiry the opinion of scientific, technical and educational circles of all countries (offering them, in fact, the French document as basis);
to gather and study the answers;

to make recommendations for a single practical system of units of measurement, suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention.

⁽⁶⁾ A table, prepared in response to this request, was approved and published by the CIPM in 1950 (PV, 22, p. 92).

symbols and numbers — *Writing and printing of unit symbols and of numbers* (CR, p. 70)

RESOLUTION 7

Principles

Roman (upright) type, in general lower case, is used for symbols of units; if, however, the symbols are derived from proper names, capital roman type is used. These symbols are not followed by a full stop.

In numbers, the comma (French practice) or the dot (British practice) is used only to separate the integral part of numbers from the decimal part. Numbers may be divided in groups of three in order to facilitate reading; neither dots nor commas are ever inserted in the spaces between groups.

Unit	Symbol	Unit	Symbol
· metre	m	ampere	A
· square metre	m ²	volt	V
· cubic metre	m ³	watt	W
· micron *	μ	ohm	Ω
· litre **	l	coulomb	C
· gram	g	farad	F
· tonne	t	henry	H
second	s	hertz	Hz
erg	erg	poise	P
dyne	dyn	newton	N
degree Celsius	°C	· candela (new candle *)	cd
· degree absolute ***	°K	lux	lx
calorie	cal	lumen	lm
bar	bar	stilb	sb
hour	h		

Notes

I. The symbols whose unit names are preceded by dots are those which had already been adopted by a decision of the CIPM.

II. The symbol for the stère, the unit of volume for firewood, shall be « st » and not « s », which had been previously assigned to it by the CIPM.

III. To indicate a temperature interval or difference, rather than a temperature, the word « degree » in full, or the abbreviation « deg », must be used ****

* See p. 97 Resolution 7 of the 13th CGPM (1967).

** An alternative symbol L, was adopted in 1979 (see p. 102, 16th CGPM, Resolution 6).

*** Name and symbol changed in 1967 (see p. 95, 13th CGPM, Resolution 3).

**** Decision abrogated in 1967 (see p. 95: 13th CGPM, Resolution 3).

10th CGPM, 1954

thermodynamic scale — *Definition of the thermodynamic temperature scale* (CR, p. 79)

RESOLUTION 3

The 10th CGPM decides to define the thermodynamic temperature scale by choosing the triple point of water as the fundamental fixed point, and assigning to it the temperature 273,16 degrees Kelvin, exactly (7).

(7) See p. 96 Resolution 4 of the 13th CGPM (1967) which explicitly defines the kelvin.

standard atmosphere — *Definition of the standard atmosphere* (CR, p. 79)

RESOLUTION 4

The 10th CGPM, having noted that the definition of the standard atmosphere given by the 9th CGPM when defining the International Temperature Scale led some physicists to believe that this definition of the standard atmosphere was valid only for accurate work in thermometry,

declares that it adopts, for general use, the definition :

1 standard atmosphere = 1 013 250 dynes per square centimetre,
i.e., 101 325 newtons per square metre.

practical system of units — *Practical system of units* (CR, p. 80)

RESOLUTION 6

In accordance with the wish expressed by the 9th CGPM in its Resolution 6 concerning the establishment of a practical system of units of measurements for international use, the 10th CGPM

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

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

* Name changed to « kelvin » in 1967 (see p. 95 : 13th CGPM, Resolution 3).

CIPM, 1956

second — *Definition of the unit of time* (PV, 25, p. 77) *

RESOLUTION 1

In virtue of the powers invested in it by Resolution 5 of the 10th CGPM, the CIPM, *considering*

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

2. that, according to the decisions of the 8th General Assembly of the International Astronomical Union (Rome, 1952), the second of ephemeris time (ET) is the fraction $\frac{12\,960\,276\,813}{408\,986\,496} \times 10^{-9}$ of the tropical year for 1900 January 0 at 12 h ET,

decides

« The second is the fraction 1/31 556 925,974 7 of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time ». *

* Definition abrogated in 1967 (see p. 95 : 13th CGPM, Resolution 1).

SI — *International System of Units* (PV, 25, p. 83)

RESOLUTION 3

The CIPM,

considering

the task entrusted to it by Resolution 6 of the 9th CGPM concerning the establishment of a practical system of units of measurement suitable for adoption by all countries adhering to the Metre Convention,

the documents received from twenty-one countries in reply to the enquiry requested by the 9th CGPM,

Resolution 6 of the 10th CGPM, fixing the base units of the system to be established,

recommends

1. that the name « International System of Units » be given to the system founded on the base units adopted by the 10th CGPM, viz. :

[There follows the list of the six base units with their symbols, reproduced in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

2. that the units listed in the table below be used, without excluding others which might be added later :

[There follows the table of units reproduced in paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960)].

11th CGPM, 1960

metre — *Definition of the metre* (CR, p. 85) *

RESOLUTION 6

The 11th CGPM,

considering

that the international Prototype does not define the metre with an accuracy adequate for the present needs of metrology,

that it is moreover desirable to adopt a natural and indestructible standard,

decides

1. The metre is the length equal to 1 650 763,73 wavelengths in vacuum of the radiation corresponding to the transition between the levels $2p_{10}$ and $5d_5$ of the krypton 86 atom. *

2. The definition of the metre in force since 1889, based on the international Prototype of platinum-iridium, is abrogated.

3. The international Prototype of the metre sanctioned by the 1st CGPM in 1889 shall be kept at the BIPM under the conditions specified in 1889.

* Definition abrogated in 1983 (see p. 103 : 17th CGPM, Resolution 1).

second — *Definition of the unit of time* (CR, p. 86) *

RESOLUTION 9

The 11th CGPM,

considering

the powers given to the CIPM by the 10th CGPM to define the fundamental unit of time,

the decision taken by the CIPM in 1956,

ratifies the following definition :

« The second is the fraction $1/31\,556\,925,974\,7$ of the tropical year for 1900 January 0 at 12 hours ephemeris time ». *

* Definition abrogated in 1967 (see p. 95 : 13th CGPM, Resolution 1).

SI — *International System of Units* (CR, p. 87)

RESOLUTION 12

The 11th CGPM,

considering

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

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

Resolution 3 adopted by the CIPM in 1956,
the recommendations adopted by the CIPM in 1958 concerning an abbreviation for the name of the system, and prefixes to form multiples and sub-multiples of the units,

decides

1. the system founded on the six base units above is called the « International System of Units » : **
2. the international abbreviation of the name of the system is : SI;
3. names of multiples and sub-multiples of the units are formed by means of the following prefixes : ***

Multiplying factor	Prefix	Symbol	Multiplying factor	Prefix	Symbol
1 000 000 000 000 = 10 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

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

SUPPLEMENTARY UNITS

plane angle	radian	rad
solid angle	steradian	sr

DERIVED UNITS ****

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

* Name and symbol of unit modified in 1967 (see p. 95 : 13th CGPM, Resolution 3).

** A seventh base unit, the mole, was adopted in 1971 by the 14th CGPM, Resolution 3, see p. 99).

*** See pages 94 and 100 for four new prefixes adopted by the 12th CGPM (1964), Resolution 8, and the 15th CGPM (1975), Resolution 10.

**** See p. 96 for the other units added by the 13th CGPM (1967), Resolution 6.

**cubic decimetre
and litre**

- *Cubic decimetre and litre* (CR, p. 88)

RESOLUTION 13

The 11th CGPM,

considering

that the cubic decimetre and the litre are unequal and differ by about 28 parts in 10^6 ,
that determinations of physical quantities which involve measurements of volume are
being made more and more accurately, thus increasing the risk of confusion between the
cubic decimetre and the litre,

requests the CIPM to study the problem and submit its conclusions to the 12th CGPM.

CIPM, 1961

- *Cubic decimetre and litre* (PV, 29, p. 34)

RECOMMENDATION

The CIPM recommends that the results of accurate measurements of volume be
expressed in units of the International System and not in litres.

12th CGPM, 1964

**frequency
standard**

- *Atomic standard of frequency* (CR, p. 93)

RESOLUTION 5

The 12th CGPM,

considering

that the 11th CGPM noted in its Resolution 10 the urgency, in the interests of accurate
metrology, of adopting an atomic or molecular standard of time interval,

that, in spite of the results already obtained with caesium atomic frequency standards,
the time has not yet come for the CGPM to adopt a new definition of the second, base unit
of the International System of Units, because of the new and considerable improvements
likely to be obtained from work now in progress,

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

empowers the CIPM to name the atomic or molecular frequency standards to be
employed for the time being,

requests the Organizations and Laboratories knowledgeable in this field to pursue
work connected with a new definition of the second.

DECLARATION OF THE CIPM (1964) (PV, 32, p. 26 and CR, p. 93)

The CIPM,

empowered by Resolution 5 of the 12th CGPM to name atomic or molecular frequency
standards for temporary use for time measurements in physics,

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

litre — *Litre* (CR, p. 93)

RESOLUTION 6

The 12th CGPM,

considering Resolution 13 adopted by the 11th CGPM in 1960 and the Recommendation adopted by the CIPM in 1961,

1. *abrogates* the definition of the litre given in 1901 by the 3rd CGPM,
2. *declares* that the word « litre » may be employed as a special name for the cubic decimetre,
3. *recommends* that the name litre should not be employed to give the results of high-accuracy volume measurements.

curie — *Curie* (CR, p. 94)

RESOLUTION 7

The 12th CGPM,

considering that the curie has been used for a long time in many countries as unit of activity for radionuclides,

recognizing that in the International System of Units (SI), the unit of this activity is the second to the power of minus one (s^{-1}),*

accepts that the curie be still retained, outside SI, as unit of activity, with the value $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$. The symbol for this unit is Ci.

* In 1975 the name « becquerel » (Bq) was adopted for the SI unit of activity (*see* p. 100: 15th CGPM, Resolution 8): $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

**femto
and atto** — *SI prefixes femto and atto* (CR, p. 94)

RESOLUTION 8

The 12th CGPM,

decides to add to the list of prefixes for the formation of names of multiples and sub-multiples of units, adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the following two new prefixes :

Multiplying factor	Prefix	Symbol
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

13th CGPM, 1967-1968

second — *SI unit of time (second)* (CR, p. 103)

RESOLUTION 1

The 13th CGPM,

considering

that the definition of the second adopted by the CIPM in 1956 (Resolution 1) and ratified by Resolution 9 of the 11th CGPM (1960), later upheld by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), is inadequate for the present needs of metrology,

that at its meeting of 1964 the CIPM, empowered by Resolution 5 of the 12th CGPM (1964), recommended, in order to fulfil these requirements, a caesium atomic frequency standard for temporary use,

that this frequency standard has now been sufficiently tested and found sufficiently accurate to provide a definition of the second fulfilling present requirements,

that the time has now come to replace the definition now in force of the unit of time of the International System of Units by an atomic definition based on that standard,

decides

1. The SI unit of time is the second defined as follows :

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

2. Resolution 1 adopted by the CIPM at its meeting of 1956 and Resolution 9 of the 11th CGPM are now abrogated.

kelvin
(degree Celsius)

— *SI unit of thermodynamic temperature (kelvin)* (CR, p. 104)

RESOLUTION 3

The 13th CGPM,

considering

the names « degree Kelvin » and « degree », the symbols « °K » and « deg » and the rules for their use given in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948), in Resolution 12 of the 11th CGPM (1960), and the decision taken by the CIPM in 1962 (PV, 30, p. 27),

that the unit of thermodynamic temperature and the unit of temperature interval are one and the same unit, which ought to be denoted by a single name and a single symbol,

decides

1. the unit of thermodynamic temperature is denoted by the name « kelvin » and its symbol is « K »;

2. the same name and the same symbol are used to express a temperature interval;
3. a temperature interval may also be expressed in degrees Celsius;
4. the decisions mentioned in the opening paragraph concerning the name of the unit of thermodynamic temperature, its symbol and the designation of the unit to express an interval or a difference of temperatures are abrogated, but the usages which derive from these decisions remain permissible for the time being.*

* At its 1980 meeting the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU which requested that the use of the symbols «K» and «deg» no longer be permitted.

kelvin

RESOLUTION 4

The 13th CGPM,

considering that it is useful to formulate more explicitly the definition of the unit of thermodynamic temperature contained in Resolution 3 of the 10th CGPM (1954),

decides to express this definition as follows :

« The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273,16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water ».

candela — *SI unit of luminous intensity (candela) (CR, p. 104) **

RESOLUTION 5

The 13th CGPM,

considering

the definition of the unit of luminous intensity ratified by the 9th CGPM (1948) and contained in the « Resolution concerning the change of photometric units » adopted by the CIPM in 1946 (PV, 20, p. 119) in virtue of the powers conferred by the 8th CGPM (1933),

that this definition fixes satisfactorily the unit of luminous intensity, but that its wording may be open to criticism,

decides to express the definition of the candela as follows :

« The candela is the luminous intensity, in the perpendicular direction, of a surface of $1/600\,000$ square metre of a black body at the temperature of freezing platinum under a pressure of $101\,325$ newtons per square metre ».*

* Definition abrogated in 1979 (see p. 101, 16th CGPM, Resolution 3).

**SI
derived units**

— *SI derived units (CR, p. 105).*

RESOLUTION 6

The 13th CGPM,

considering that it is useful to add some derived units to the list of paragraph 4 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960),

decides to add :

wave number	1 per metre	m^{-1}
entropy	joule per kelvin	J/K
specific heat capacity	joule per kilogram kelvin	J/(kg · K)
thermal conductivity	watt per metre kelvin	W/(m · K)
radiant intensity	watt per steradian	W/sr
activity (of a radioactive source)	1 per second	s^{-1} *

* The unit of activity received a special name and symbol in 1975 (see p. 100 : 15th CGPM, Resolution 8).

**micron (μ)
new candle**

— *Abrogation of earlier decisions (micron, new candle) (CR, p. 105).*

RESOLUTION 7

The 13th CGPM,

considering that subsequent decisions of the General Conference concerning the International System of Units are incompatible with parts of Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

decides accordingly to remove from Resolution 7 of the 9th Conference :

1. the unit name « micron », and the symbol « μ » which had been given to that unit but which has now become a prefix;
2. the unit name « new candle ».

CIPM, 1967

**multiples of
kilogram**

— *Decimal multiples and sub-multiples of the unit of mass (PV, 35, p. 29)*

RECOMMENDATION 2

The CIPM,

considering that the rule for forming names of decimal multiples and sub-multiples of the units of paragraph 3 of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960) might be interpreted in different ways when applied to the unit of mass,

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

CIPM, 1969

SI — *International System of Units : Rules for application of Resolution 12 of the 11th CGPM (1960) (PV, 37, p. 30)*

RECOMMENDATION 1 (1969)

The CIPM,

considering that Resolution 12 of the 11th CGPM (1960) concerning the International System of Units, has provoked discussions on certain of its aspects,

declares

1. the base units, the supplementary units and the derived units of the International System of Units, which form a coherent set, are denoted by the name « SI units »;
2. the prefixes adopted by the CGPM for the formation of decimal multiples and sub-multiples of SI units are called « SI prefixes »;

and *recommends*

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

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

* See p. 102 : Recommendation 1 (CI-1980) of the CIPM.

14th CGPM, 1971

pascal — *Pascal; siemens*
siemens

The 14th CGPM (CR, p. 59) adopted the special names « pascal » (symbol Pa), for the SI unit newton per square metre, and « siemens » (symbol S), for the SI unit of electric conductance (reciprocal ohm).

TAI — *International Atomic Time; function of CIPM* (CR, p. 77)

RESOLUTION 1

The 14th CGPM,

considering

that the second, unit of time of the International System of Units, has since 1967 been defined in terms of a natural atomic frequency, and no longer in terms of the time scales provided by astronomical motions,

that the need for an International Atomic Time (TAI) scale is a consequence of the atomic definition of the second,

that several international organizations have ensured and are still successfully ensuring the establishment of the time scales based on astronomical motions, particularly thanks to the permanent services of the Bureau International de l'Heure (BIH),

that the BIH has started to establish an atomic time scale of recognized quality and proven usefulness,

that the atomic frequency standards for realizing the second have been considered and must continue to be considered by the CIPM helped by a Consultative Committee, and that the unit interval of the International Atomic Time scale must be the second realized according to its atomic definition,

that all the competent international scientific organizations and the national laboratories active in this field have expressed the wish that the CIPM and the CGPM should give a definition of International Atomic Time, and should contribute to the establishment of the International Atomic Time scale,

that the usefulness of International Atomic Time entails close coordination with the time scales based on astronomical motions,

requests the CIPM

1. to give a definition of International Atomic Time ⁽⁶⁾;
2. to take the necessary steps, in agreement with the international organizations concerned, to ensure that available scientific competence and existing facilities are used in the best possible way to realize the International Atomic Time scale and to satisfy the requirements of users of International Atomic Time.

mole — *SI unit of amount of substance (mole)* (CR, p. 78)

RESOLUTION 3

The 14th CGPM,

considering the advice of the International Union of Pure and Applied Physics, of the International Union of Pure and Applied Chemistry, and of the International Organization for Standardization, concerning the need to define a unit of amount of substance,

decides

1. The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms * in 0,012 kilogram of carbon 12: its symbol is « mol ».
2. When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
3. The mole is a base unit of the International System of Units.

* At its 1980 meeting, the CIPM approved the report of the 7th meeting of the CCU (1980) specifying that « in this definition, it is understood that unbound atoms of carbon 12, at rest and in their ground state, are referred to ».

15th CGPM, 1975

speed of light — *Recommended value* (CR, p. 103)

RESOLUTION 2

The 15th CGPM,

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

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

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

* The uncertainty given here corresponds to three standard deviations.

⁽⁶⁾ See page 110.

UTC — *Coordinated Universal Time* (CR, p. 104)

RESOLUTION 5

The 15th CGPM,

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

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

judges that this usage can be strongly endorsed.

becquerel
gray — *SI units for ionizing radiations* (CR, p. 105)

RESOLUTIONS 8 AND 9

The 15th CGPM,

by reason of the pressing requirement, expressed by the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), to extend the use of the International System of Units to radiological research and applications,

by reason of the need to make as easy as possible the use of the units for non-specialists,

taking into consideration also the grave risks of errors in therapeutic work,

adopts the following special name for the SI unit of activity :
becquerel, symbol Bq, equal to one reciprocal second } Resolution 8

adopts the following special name for the SI unit of ionizing radiation :
gray, symbol Gy, equal to one joule per kilogram. } Resolution 9

Note. — The gray is the SI unit of absorbed dose. In the field of ionizing radiation the gray may also be used with other physical quantities also expressed in joules per kilogram : the CCU is made responsible for studying this matter in collaboration with the competent international organizations ⁽⁹⁾.

peta
exa — *SI prefixes peta and exa* (CR, p. 106)

RESOLUTION 10

The 15th CGPM

decides to add to the list of SI prefixes to be used for multiples, which was adopted by the 11th CGPM, Resolution 12, paragraph 3, the two following prefixes :

Multiplying factor	Prefix	Symbol
10^{15}	peta	P
10^{18}	exa	E

⁽⁹⁾ At its 1976 meeting, the CIPM approved the report of the 5th meeting of the CCU (1976), specifying that, following the advice of the ICRU, the gray may also be used to express specific energy imparted, kerma and absorbed dose index.

16th CGPM, 1979

candela — *SI unit of luminous intensity (candela)* (CR, p. 100)

RESOLUTION 3

The 16th CGPM,

considering

that despite the notable efforts of some laboratories there remain excessive divergences between the results of realizations of the candela based upon the present black body primary standard,

that radiometric techniques are developing rapidly, allowing precisions that are already equivalent to those of photometry and that these techniques are already in use in national laboratories to realize the candela without having to construct a black body,

that the relation between luminous quantities of photometry and radiometric quantities, namely the value of 683 lumens per watt for the spectral luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz, has been adopted by the CIPM in 1977,

that this value has been accepted as being sufficiently accurate for the system of luminous photopic quantities, that it implies a change of only about 3 % for the system of luminous scotopic quantities, and that it therefore ensures satisfactory continuity,

that the time has come to give the candela a definition that will allow an improvement in both the ease of realization and the precision of photometric standards, and that applies to both photopic and scotopic photometric quantities and to quantities yet to be defined in the mesopic field,

decides

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

2. The definition of the candela (at the time called new candle) adopted by the CIPM in 1946 by reason of the powers conferred by the 8th CGPM in 1933, ratified by the 9th CGPM in 1948, then amended by the 13th CGPM in 1967, is abrogated.

sievert — *Special name for the SI unit of dose equivalent* (CR, p. 100)

RESOLUTION 5

The 16th CGPM,

considering

the effort made to introduce SI units into the field of ionizing radiations, the risk to human beings of an underestimated radiation dose, a risk that could result from a confusion between absorbed dose and dose equivalent,

that the proliferation of special names represents a danger for the International System of Units and must be avoided in every possible way, but that this rule can be broken when it is a matter of safeguarding human health,

adopts the special name *sievert*, symbol Sv, for the SI unit of dose equivalent in the field of radioprotection. The sievert is equal to the joule per kilogram⁽¹⁰⁾.

litre — *Symbols for the litre* (CR, p. 101)

RESOLUTION 6

The 16th CGPM,

recognizing the general principles adopted for writing the unit symbols in Resolution 7 of the 9th CGPM (1948),

considering that the symbol l for the unit litre was adopted by the CIPM in 1879 and confirmed in the same Resolution of 1948,

considering also that, in order to avoid the risk of confusion between the letter l and the number 1, several countries have adopted the symbol L instead of l for the unit litre,

considering that the name litre, although not included in the International System of Units, must be admitted for general use with the System,

decides, as an exception, to adopt the two symbols l and L as symbols to be used for the unit litre,

considering further that in the future only one of these two symbols should be retained,

invites the CIPM to follow the development of the use of these two symbols and to give the 18th CGPM its opinion as to the possibility of suppressing one of them⁽¹¹⁾.

CIPM 1980

SI
supplementary
units

— *SI supplementary units (radian and steradian)* (PV, 48, p. 24)

RECOMMENDATION 1 (CI-1980)

The CIPM,

taking into consideration Resolution 3 adopted by ISO/TC12 in 1978 and Recommendation U 1 (1980) adopted by the CCU at its 7th meeting,

⁽¹⁰⁾ At its 1984 meeting the CIPM decided to accompany this Resolution with the following explanation (see Recommendation 1 (CI-1984), page 104):

« The quantity dose equivalent H is the product of the absorbed dose D of ionizing radiation and the dimensionless factors Q (quality factor) and N (product of any other multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection :

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

Thus, for a given radiation, the numerical value of H in joules per kilogram may differ from that of D in joules per kilogram depending upon the values of Q and N . In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose D and the dose equivalent H , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose D and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent H . »

⁽¹¹⁾ The CIPM, at its 79th meeting in 1990, considered that it was still too early to make a final choice.

considering

— that the units radian and steradian are usually introduced into expressions for units when there is need for clarification, especially in photometry where the steradian plays an important role in distinguishing between units corresponding to different quantities,

— that in the equations used one generally expresses plane angle as the ratio of two lengths and solid angle as the ratio between an area and the square of a length, and consequently that these quantities are treated as dimensionless quantities,

— that the study of the formalisms in use in the scientific field shows that none exists which is at the same time coherent and convenient and in which the quantities plane angle and solid angle might be considered as base quantities,

considering also

— that the interpretation given by the CIPM in 1969 for the class of supplementary units introduced in Resolution 12 of the 11th CGPM in 1960 allows the freedom of treating the radian and the steradian as SI base units,

— that such a possibility compromises the internal coherence of the SI based on only seven base units,

decides to interpret the class of supplementary units in the International System as a class of dimensionless derived units for which the CGPM allows the freedom of using or not using them in expressions for SI derived units.

17th CGPM, 1983

metre — *Definition of the metre* (CR, p. 97)

RESOLUTION 1

The 17th CGPM,

considering

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

that progress made in the stabilization of lasers allows radiations to be obtained that are more reproducible and easier to use than the standard radiation emitted by a krypton 86 lamp,

that progress made in the measurement of the frequency and wavelength of these radiations has resulted in concordant determinations of the speed of light whose accuracy is limited principally by the realization of the present definition of the metre,

that wavelengths determined from frequency measurements and a given value for the speed of light have a reproducibility superior to that which can be obtained by comparison with the wavelength of the standard radiation of krypton 86,

that there is an advantage, notably for astronomy and geodesy, in maintaining unchanged the value of the speed of light recommended in 1975 by the 15th CGPM in its Resolution 2 ($c = 299\,792\,458$ m/s),

that a new definition of the metre has been envisaged in various forms all of which have the effect of giving the speed of light an exact value, equal to the recommended value, and that this introduces no appreciable discontinuity into the unit of length, taking into

account the relative uncertainty* of $\pm 4 \times 10^{-9}$ of the best realizations of the present definition of the metre.

that these various forms, making reference either to the path travelled by light in a specified time interval or to the wavelength of a radiation of measured or specified frequency, have been the object of consultations and deep discussions, have been recognized as being equivalent and that a consensus has emerged in favour of the first form,

that the CIPM is now in a position to give instructions for the practical realization of such a definition, instructions which could include the use of the orange radiation of krypton 86 used as standard up to now, and which may in due course be extended or revised,

decides

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

2. The definition of the metre in force since 1960, based upon the transition between the levels $2p_{10}$ and $5d_5$ of the atom of krypton 86, is abrogated.

* The uncertainty given here corresponds to three standard deviations.

metre — *On the realization of the definition of the metre* (CR, p. 98)

RESOLUTION 2

The 17th CGPM

invites the CIPM

to draw up instructions for the practical realization of the new definition of the metre⁽¹⁾,

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

CIPM, 1984

gray
sievert — *Concerning the sievert* (PV, 52, p. 31)

RECOMMENDATION 1 (CI-1984)

The CIPM,

considering the confusion which continues to exist on the subject of Resolution 5, approved by the 16th CGPM (1979),

decides to introduce the following explanation in the brochure « Le Système International d'Unités (SI) » :

« The quantity dose equivalent H is the product of the absorbed dose D of ionizing radiation and the dimensionless factors Q (quality factor) and N (product of any other

⁽¹⁾ See Appendix II, p. 106, Recommendation 1 (CI-1983) adopted by the CIPM in 1983.

multiplying factors) stipulated by the International Commission on Radiological Protection :

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

Thus, for a given radiation, the numerical value of H in joules per kilogram may differ from that of D in joules per kilogram depending upon the values of Q and N . In order to avoid any risk of confusion between the absorbed dose D and the dose equivalent H , the special names for the respective units should be used, that is, the name gray should be used instead of joules per kilogram for the unit of absorbed dose D and the name sievert instead of joules per kilogram for the unit of dose equivalent H . »

CIPM, 1990

zetta, zepto — *SI prefixes zetta, zepto, yotta and yocto* ⁽¹³⁾
yotta, yocto

DRAFT RESOLUTION D TO THE 19th CGPM

The 19th Conférence Générale des Poids et Mesures,

decides to add to the list of SI prefixes to be used for multiples and submultiples of units, adopted by the 11th Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), Resolution 12, paragraph 3, the 12th CGPM, Resolution 8 and the 15th CGPM, Resolution 10, the following prefixes :

Multiplying factor	Prefix	Symbol
10^{21}	zetta	Z
10^{-21}	zepto	z
10^{24}	yotta	Y
10^{-24}	yocto	y

⁽¹³⁾ The names zepto and zetta are derived from septo suggesting the number seven (the seventh power of 10^3) and the letter «z» is substituted for the letter «s» to avoid the duplicate use of the letter «s» as a symbol.

The names yocto and yotta are derived from octo, suggesting the number eight (the eighth power of 10^3); the letter «y» is added to avoid the use of the letter «o» as a symbol because it may be confused with the number zero.

APPENDIX II

Practical realization of the definitions of some important units

1. Length

The Recommendation 1 (CI-1983) was adopted by the CIPM in 1983 to specify the rules for the practical realization of the definition of the metre :

The CIPM

recommends

— that the metre be realized by one of the following methods :

a) by means of the length l of the path travelled in vacuum by a plane electromagnetic wave in a time t ; this length is obtained from the measured time t , using the relation $l = c \cdot t$ and the value of the speed of light in vacuum $c = 299\,792\,458$ m/s;

b) by means of the wavelength in vacuum λ of a plane electromagnetic wave of frequency f ; this wavelength is obtained from the measured frequency f , using the relation $\lambda = c/f$ and the value of the speed of light in vacuum $c = 299\,792\,458$ m/s;

c) by means of one of the radiations from the list below, whose stated wavelength in vacuum or whose stated frequency can be used with the uncertainty shown, provided that the given specifications and accepted good practice are followed;

— and that in all cases any necessary corrections be applied to take account of actual conditions such as diffraction, gravitation, or imperfection in the vacuum.

LIST OF RECOMMENDED RADIATIONS, 1983

In this list, the values of the frequency f and of the wavelength λ should be related exactly by the relation $\lambda f = c$, with $c = 299\,792\,458$ m/s but the values of λ are rounded.

1. — Radiations of Lasers Stabilized by Saturated Absorption *

1.1. — Absorbing molecule CH₄, transition ν_3 , P(7), component F₂⁽²⁾.

The values $f = 88\,376\,181\,608$ kHz

$\lambda = 3\,392\,231\,397,0$ fm

with an estimated overall relative uncertainty of $\pm 1,3 \times 10^{-10}$ [which results from an estimated relative standard deviation of $0,44 \times 10^{-10}$] apply to the radiation of a He-Ne

laser stabilized with a cell of methane, within or external to the laser, subject to the conditions :

- methane pressure ≤ 3 Pa
- mean one-way axial intracavity surface power density ** $\leq 10^4$ W m⁻²
- radius of wavefront curvature ≥ 1 m
- inequality of power between counter-propagating waves ≤ 5 %.

1.2. — Absorbing molecule ¹²⁷I₂, transition 17-1, P(62), component o.

The values $f = 520\,206\,808,51$ MHz
 $\lambda = 576\,294\,760,27$ fm

with an estimated *** overall relative uncertainty of $\pm 6 \times 10^{-10}$ [which results from an estimated relative standard deviation of 2×10^{-10}] apply to the radiation of a dye laser (or frequency-doubled He-Ne laser) stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of $6^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

1.3. — Absorbing molecule ¹²⁷I₂, transition 11-5, R(127), component i.

The values $f = 473\,612\,214,8$ MHz
 $\lambda = 632\,991\,398,1$ fm

with an estimated overall relative uncertainty of $\pm 1 \times 10^{-9}$ [which results from an estimated relative standard deviation of $3,4 \times 10^{-10}$] apply to the radiation of a stabilized He-Ne laser containing an iodine cell, subject to the conditions :

- cell-wall temperature between 16°C and 50°C with a cold-finger temperature of $15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$
- one-way intracavity beam power ** $15\text{ mW} \pm 10\text{ mW}$
- frequency modulation amplitude, peak to peak, $6\text{ MHz} \pm 1\text{ MHz}$.

1.4. — Absorbing molecule ¹²⁷I₂, transition 9-2, R(47), component o.

The values $f = 489\,880\,355,1$ MHz
 $\lambda = 611\,970\,769,8$ fm

with an estimated overall relative uncertainty of $\pm 1,1 \times 10^{-9}$ [which results from an estimated relative standard deviation of $3,7 \times 10^{-10}$] apply to the radiation of a He-Ne laser stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

1.5. — Absorbing molecule ¹²⁷I₂, transition 43-0, P(13), component a₃ (sometimes called component s).

The values $f = 582\,490\,603,6$ MHz
 $\lambda = 514\,673\,466,2$ fm

with an estimated overall relative uncertainty of $\pm 1,3 \times 10^{-9}$ [which results from an estimated relative standard deviation of $4,3 \times 10^{-10}$] apply to the radiation of an Ar⁺ laser stabilized with a cell of iodine, within or external to the laser, having a cold-finger temperature of $-5^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Notes

* Each of these radiations can be replaced, without degrading the accuracy, by a radiation corresponding to another component of the same transition or by another radiation, when the frequency difference is known with sufficient accuracy. Details of methods of stabilization are described in numerous scientific and technical publications. References to appropriate articles, illustrating accepted good practice for a particular radiation, may be obtained by application to a member laboratory of the CCDM, or the BIPM.

** The one-way intracavity beam power is obtained by dividing the output power by the transmittance of the output mirror.

*** This uncertainty, and the frequency and wavelength values, are based on the weighted mean of only two determinations. The more precise of the two, however, was a measurement dependent only on frequency mixing and multiplication techniques relative to the radiation in 1.1 above.

2. — *Radiations of Spectral Lamps*

2.1. — Radiations corresponding to the transition between the levels $2p_{10}$ and $5d_5$ of the atom of ^{86}Kr .

The value $\lambda = 605\,780\,210\text{ fm}$

with an estimated overall relative uncertainty of $\pm 4 \times 10^{-9}$ [which results from an estimated relative standard deviation of $1,3 \times 10^{-9}$] applies to the radiation emitted by a lamp operated under the conditions recommended by the CIPM (*Procès-Verbaux CIPM*, 49th session, 1960, pp. 71-72 and *Comptes Rendus, 11th CGPM*, 1960, p. 85).

2.2. — Radiations of the atoms ^{86}Kr , ^{198}Hg and ^{114}Cd recommended by the CIPM in 1963 (*Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, 3rd session, 1962, pp. 18-19 and *Procès-Verbaux CIPM*, 52nd session, 1963, pp. 26-27), with the indicated values for the wavelengths and the corresponding uncertainties.

2. Mass

The unit of mass, the kilogram, is the mass of the international prototype of the kilogram kept at the BIPM. The masses of 1 kg secondary standards of platinum-iridium or of stainless-steel are compared with the mass of the prototype by means of balances whose precision can reach 1 in 10^8 or better. In the case of stainless-steel standards, the accuracy of comparison depends upon the accuracy with which the correction due to air-buoyancy is known.

By an easy operation a series of masses can be standardized to obtain multiples and sub-multiples of the kilogram.

3. Time

Unit of time, frequency

Some research laboratories are able to construct the equipment required to produce electric oscillations at a frequency whose relationship to the transition frequency of the atom of caesium 133 which defines the second is known. It is possible thus to obtain both the second and pulses at desired frequencies, 1 Hz, 1 kHz, etc. In the best equipment, the uncertainty is at present estimated to be a few parts in 10^{14} for averages extending over periods from a few hours to a few days. Commercial caesium-beam time standards are also available having uncertainties of about 3 parts in 10^{12} .

There exist very stable clocks and frequency generators besides those using caesium, including the hydrogen maser, and rubidium and quartz clocks. Their frequencies have to be standardized by comparison with a caesium time standard, either directly or by means of radio transmissions. Some of these transmissions emit signals whose frequencies are known with uncertainties (standard deviations) from 1 part in 10^{11} to 5 parts in 10^{13} . These transmissions cover the whole surface of the Earth, but reception may sometimes be difficult owing to uneven propagation. When a higher accuracy is required it is better to use time comparisons, as explained below.

Time scales

Some caesium-beam standards made in national laboratories operate continuously as time standards. However, many national time services use continuously-running commercial caesium standards that are maintained under careful environmental control. Since 1969 it has been possible to compare these various instruments, over intercontinental distances, with uncertainties of only a few hundred nanoseconds. It has thus been possible to establish a mean atomic-time scale sufficiently secure for it to serve as the basis of the world's time reference. This scale, approved by Resolution 1 of the 14th CGPM in 1971, was given the name International Atomic Time (TAI) ⁽¹⁾. Through the use of the satellite system «Global Positioning System» (GPS) TAI is now accessible worldwide to within about twenty nanoseconds.

TAI is not directly distributed. Time signals broadcast by radio waves are given on a time scale called Coordinated Universal Time (UTC) as recommended by the 15th CGPM (Resolution 5) in 1975. UTC is defined in such a manner that it differs from International Atomic Time (TAI) by a whole number of seconds. The difference UTC - TAI was set equal to - 10 s starting the first of January 1972, the date of application of the reformulation of UTC which previously involved a frequency offset; this difference can be modified by 1 second by the use of a positive or negative leap second at the end of a month of UTC, preferably in the first instance at the end of December or of June, and in the second instance at the end of March or of September, in order to keep UTC in agreement with the time defined by the rotation of the Earth with an approximation better than 0,9 s ⁽²⁾. Furthermore, the legal times of most countries are offset from UTC by a whole number of hours (time zones and «summer» time).

National time-service laboratories maintain an approximation to UTC known as UTC(k) for laboratory k. The differences between UTC(k) and UTC are in general no more than a few microseconds.

The precision and accuracy of time measurement sometimes require relativistic effects to be taken into account. The definition of the second must be understood as the definition of the unit of proper time, i.e., strictly speaking the user must be in the neighbourhood of the clock and at rest with respect to it. In general, within the expanse of a laboratory, only the effects of special relativity are significant, if the clock is in the laboratory. But, in applications which bring into play distant clocks, it may be necessary to take general relativity into account. In particular, TAI is based

⁽¹⁾ See page 110 for the definition of TAI given by CIPM at the request of the 14th CGPM (1971, Resolution 1).

⁽²⁾ The difference UTC - TAI was - 26 s on 1 January 1991.

upon a worldwide network of clocks and its definition * has been completed as follows (declaration of the CCDS: *BIPM Com. Cons. Déf. Seconde*, 9, 1980, p. S 15):

« TAI is a coordinate time scale defined in a geocentric reference frame with the SI second as realized on the rotating geoid as the scale unit ».

For all clocks fixed in relation to the Earth, situated at sea level, the scale unit of TAI has a time interval equal to that of the unit of time as realized locally, but compared to a clock at 2 000 m altitude, for example, the scale unit of TAI appears to be longer by $2,2 \times 10^{-13}$ s. In long-distance time links using geostationary satellites, the relativistic effect can reach a few hundred nanoseconds.

The scale unit of TAI (and that of UTC) conforms to its definition to within 2 or 3×10^{-14} s averaged over 10 or 20 days. By means of the signals emitted by GPS satellites, TAI and the time scale of a local clock may be compared so that the frequency of the local clock can be established to within 2 or 3 parts in 10^{14} .

* This definition, approved by the CIPM at its 59th session (October 1970), is as follows :

« International Atomic Time (TAI) is the time reference coordinate established by the Bureau International de l'Heure on the basis of the readings of atomic clocks operating in various establishments in accordance with the definition of the second, the unit of time of the International System of Units. »

4. Electrical quantities

The realization to high accuracy of the ampere (a base unit of the SI), the ohm and the volt directly in terms of their definitions is difficult and time consuming. The best such realizations of the ampere are now obtained through combinations of realizations of the watt, the ohm and the volt. The watt realized electrically is compared by beam-balance experiments with the watt realized mechanically. These experiments employ a coil in a magnetic field and are devised in such a way that it is not necessary to know either the dimensions of the coil or the magnitude of the magnetic field. The ohm is realized using a Thompson-Lampard capacitor whose value can be changed by an amount that depends only on the magnitude of a linear displacement of a guard electrode. The volt is realized by means of a balance in which an electrostatic force is measured in terms of a mechanical force. The ampere may thus be deduced from combinations of any two of these units. The uncertainty in the value of the ampere obtained in this way is estimated to be a few parts in 10^7 . The ampere, ohm and volt may also be determined from measurements of various combinations of physical constants. Laboratory reference standards for the volt and the ohm based upon the Josephson and quantum-Hall effects are, however, significantly more reproducible and stable than a few parts in 10^7 . In order to take advantage of these highly stable methods of maintaining laboratory reference standards of the electrical units while at the same time taking care not to change their SI definitions, the 18th CGPM in 1987 adopted Resolution 6.

Forthcoming adjustment to the representations of the volt and of the ohm

RESOLUTION 6

The 18th Conférence Générale des Poids et Mesures,

considering

— that worldwide uniformity and long-term stability of national representations of the electrical units are of major importance for science, commerce and industry from both the technical and economic points of view,

— that many national laboratories use the Josephson effect and are beginning to use the quantum Hall effect to maintain, respectively, representations of the volt and of the ohm, as these offer the best guarantees of long-term stability,

— that because of the importance of coherence among the units of measurement of the various physical quantities the values adopted for these representations must be as closely as possible in agreement with the SI,

— that the results of recent and current experiment will permit the establishment of an acceptable value, sufficiently compatible with the SI, for the coefficient which relates each of these effects to the corresponding electrical unit,

invites the laboratories whose work can contribute to the establishment of the quotient voltage/frequency in the case of the Josephson effect and of the quotient voltage/current for the quantum Hall effect to vigorously pursue these efforts and to communicate their results without delay to the Comité International des Poids et Mesures, and

instructs the Comité International des Poids et Mesures to recommend, as soon as it considers it possible, a value for each of these quotients together with a date for them to be put into practice simultaneously in all countries; these values should be announced at least one year in advance and would be adopted on January 1st 1990.

In 1988 the CIPM adopted Recommendations 1 (CI-1988) and 2 (CI-1988).

Representation of the volt by means of the Josephson effect

RECOMMENDATION 1 (CI-1988)

The Comité International des Poids et Mesures

acting in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

considering

— that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of 483 597,9 GHz/V for the Josephson constant, K_J , that is to say, for the quotient of frequency divided by the potential difference corresponding to the $n = 1$ step in the Josephson effect,

— that the Josephson effect together with this value of K_J can be used to establish a reference standard of electromotive force having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the volt estimated to be 4 parts in 10^7 , and a reproducibility which is significantly better,

recommends

— that 483 597,9 GHz/V exactly be adopted as a conventional value, denoted by K_{J-90} , for the Josephson constant, K_J ,

— that this new value be used from 1st January 1990, and not before, to replace the values currently in use,

— that this new value be used from this same date by all laboratories which base their measurements of electromotive force on the Josephson effect, and

— that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with the new adopted value,

is of the opinion

— that no change in this recommended value of the Josephson constant will be necessary in the foreseeable future, and

draws the attention of laboratories to the fact that the new value is greater by 3,9 GHz/V, or about 8 parts in 10^6 , than the value given in 1972 by the Comité Consultatif d'Électricité in its Declaration E-72.

Representation of the ohm by means of the quantum Hall effect

RECOMMENDATION 2 (CI-1988)

The Comité International des Poids et Mesures,

acting in accordance with instructions given in Resolution 6 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures concerning the forthcoming adjustment of the representations of the volt and the ohm,

considering

— that most existing laboratory reference standards of resistance change significantly with time,

— that a laboratory reference standard of resistance based on the quantum Hall effect would be stable and reproducible,

— that a detailed study of the results of the most recent determinations leads to a value of $25\,812,807\,\Omega$ for the von Klitzing constant, R_K , that is to say, for the quotient of the Hall potential difference divided by current corresponding to the plateau $i = 1$ in the quantum Hall effect,

— that the quantum Hall effect, together with this value of R_K , can be used to establish a reference standard of resistance having a one-standard-deviation uncertainty with respect to the ohm estimated to be 2 parts in 10^7 , and a reproducibility which is significantly better,

recommends

— that $25\,812,807\,\Omega$ exactly be adopted as a conventional value, denoted by R_{K-90} , for the von Klitzing constant, R_K ,

— that this value be used from 1st January 1990, and not before, by all laboratories which base their measurements of resistance on the quantum Hall effect,

— that from this same date all other laboratories adjust the value of their laboratory reference standards to agree with R_{K-90} ,

— that in the use of the quantum Hall effect to establish a laboratory reference standard of resistance, laboratories follow the most recent edition of the technical guidelines for reliable measurements of the quantized Hall resistance drawn up by the Comité Consultatif d'Électricité and published by the Bureau International des Poids et Mesures, and

is of the opinion

— that no change in this recommended value of the von Klitzing constant will be necessary in the foreseeable future.

The CCE at its meeting in 1988 considered very carefully the way in which the recommended conventional values K_{J-90} and R_{K-90} should be used and made additional statements to clarify these implications of the Recommendations. These statements may be summarized as follows :

(1) Recommendations 1 (CI-1988) and 2 (CI-1988) do not constitute a redefinition of SI units. The conventional values K_{J-90} and R_{K-90} cannot be used as bases for defining the volt and the ohm (meaning the present units of electromotive force and electrical resistance in the *Système International d'Unités* (SI)). To do so would change the status of μ_0 from that of a constant having an exactly defined value (and would therefore abrogate the definition of the ampere) and would also produce electrical units which would be incompatible with the definition of the kilogram and units derived from it.

(2) Concerning the use of subscripts on symbols for quantities or units, the CCE considers that symbols for electromotive force (electric potential, electric potential difference) and electric resistance, and for the volt and the ohm, should not be modified by adding subscripts to denote particular laboratories or dates.

These statements were subsequently supported by the CIPM at its 78th Meeting in 1988.

5. Temperature

Direct measurements of thermodynamic temperature can only be made by using one of only a small number of so-called primary thermometers. These are thermometers whose equation of state can be written down explicitly without having to introduce unknown temperature-dependent constants. Primary thermometers that have been used to provide accurate values of thermodynamic temperature include the constant-volume gas thermometer, the acoustic gas thermometer, the spectral and total radiation thermometers and the electronic noise thermometer. Uncertainties of 1 or 2 millikelvins have been achieved with such thermometers up to about 373 K beyond which the uncertainties increase progressively. The use of such thermometers to high accuracy is difficult and time-consuming and there exist secondary thermometers, such as the platinum resistance thermometer, whose reproducibility can be of the order of ten times better than that of any primary thermometer. In order to allow the maximum advantage to be taken of these secondary thermometers the CGPM has, in the course of time, adopted successive versions of an international temperature scale. The first of these was the International Temperature Scale of 1927 (ITS-27); this was replaced by the International Practical Temperature Scale of 1948 (IPTS-48) which in turn was replaced by the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68). In 1976 the CIPM adopted, for use at low temperatures, the 1976 Provisional 0,5 K to 30 K Temperature Scale (EPT-76). On 1 January 1990 the IPTS-68 and the EPT-76 were replaced by the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by the CIPM in 1989 in its Recommendation 5 (CI-1989).

The International Temperature Scale of 1990

RECOMMENDATION 5 (CI-1989)

The Comité International des Poids et Mesures (CIPM) acting in accordance with Resolution 7 of the 18th Conférence Générale des Poids et Mesures (1987) has adopted the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) to supersede the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68).

The CIPM *notes* that, by comparison with the IPTS-68, the ITS-90

- extends to lower temperatures, down to 0,65 K, and hence also supersedes the EPT-76,
- is in substantially better agreement with corresponding thermodynamic temperatures,
- has much improved continuity, precision and reproducibility throughout its range and
- has subranges and alternative definitions in certain ranges which greatly facilitate its use.

The CIPM also *notes* that, to accompany the text of the ITS-90 there will be two further documents, the Supplementary Information for the ITS-90 and Techniques for Approximating the ITS-90. These documents will be published by the BIPM and periodically updated.

The CIPM *recommends*

- that on 1 January 1990 the ITS-90 come into force and
- that from this same date the IPTS-68 and the EPT-76 be abrogated.

The ITS-90 extends upwards from 0,65 K to the highest temperature measurable using an optical pyrometer. The Scale is defined in terms of the helium vapour-pressure equations from 0,65 K to 5 K, interpolating constant-volume gas thermometers from 3 K to 24,5561 K, platinum resistance thermometers from 13,8033 K to 961,78 °C and the Planck radiation law at higher temperatures, together with a set of defining fixed points and methods of interpolating between them. These defining fixed points are the temperatures assigned by agreement to a number of experimentally realizable thermodynamic states. In several ranges of temperature more than one definition of T_{90} , the temperature defined by the Scale, exists. The various definitions have equal validity.

Advice on the realization and implementation of the ITS-90 is given in the two documents «Supplementary Information for the ITS-90» and «Techniques for Approximating the ITS-90» which are approved and updated periodically by the CCT and published by the BIPM.

6. Amount of substance

All quantitative results of chemical analysis or of dosages can be expressed in moles, in other words in units of amount of substance of the elementary entities. The principle of physical measurement based on the definition of this unit is explained below.

The simplest case is that of a sample of a pure substance that is considered to be formed of atoms; call X the chemical symbol of these atoms. A mole of atoms X contains by definition as many atoms as there are ^{12}C atoms in 0,012 kilogram of carbon 12. As neither the mass $m(^{12}\text{C})$ of an atom of carbon 12 nor the mass $m(\text{X})$ of an atom X can be measured accurately, we use the ratio of these masses, $m(\text{X})/m(^{12}\text{C})$, which can be accurately determined⁽³⁾. The mass corresponding to 1 mole of X is then

⁽³⁾ There are many methods of measuring this ratio, the most direct one being by the mass spectrograph.

$[m(X)/m(^{12}\text{C})] \times 0,012 \text{ kg}$, which is expressed by saying that the molar mass $M(X)$ of X (quotient of mass by amount of substance) is

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

For example, the atom of fluorine ^{19}F and the atom of carbon ^{12}C have masses which are in the ratio 18,9984/12. The molar mass of the molecular gas F_2 is:

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

The amount of substance corresponding to a given mass of gas F_2 , 0,05 kg for example, is:

$$\frac{0,05 \text{ kg}}{0,037\,996\,8 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}} = 1,315\,90 \text{ mol.}$$

In the case of a pure substance that is supposed made up of molecules B, which are combinations of atoms X, Y, ... according to the chemical formula $\text{B} = \text{X}_\alpha\text{Y}_\beta\dots$, the mass of one molecule is $m(\text{B}) = \alpha m(\text{X}) + \beta m(\text{Y}) + \dots$.

This mass is not known with accuracy but the ratio $m(\text{B})/m(^{12}\text{C})$ can be determined accurately. The molar mass of a molecular substance B is then

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

The same procedure is used in the more general case when the composition of the substance B is specified as $\text{X}_\alpha\text{Y}_\beta$ even if α, β, \dots are not integers. If we denote the mass ratios $m(\text{X})/m(^{12}\text{C})$, $m(\text{Y})/m(^{12}\text{C})$, ... by $r(\text{X})$, $r(\text{Y})$, ..., the molar mass of the substance B is given by the formula:

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

There are other methods based on the laws of physics and physical chemistry for measuring amounts of substance; three examples are given below:

With perfect gases, 1 mole of particles of any gas occupies the same volume at a temperature T and a pressure p (approximately $0,022\,4 \text{ m}^3$ at $T = 273,16 \text{ K}$ and $p = 101\,325 \text{ Pa}$); hence a method of measuring the ratio of amounts of substance for any two gases (the corrections to apply if the gases are not perfect are well known).

For quantitative electrolytic reactions the ratio of amounts of substance can be obtained by measuring quantities of electricity. For example, 1 mole of Ag and 1/2 mole of Cu are deposited on a cathode by the same quantity of electricity (approximately $96\,487 \text{ C}$).

Application of the laws of Raoult is yet another method of determining ratios of amounts of substance in extremely dilute solutions.

7. Photometric quantities

The method approved by the CIPM in 1937 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 18, p. 237) for determining the value of photometric quantities for luminous sources whose radiation does not have the same spectral composition, utilizes a procedure taking account of the « spectral luminous efficiencies » $V(\lambda)$. By its Recommendation

1(CI-1972), the CIPM recommends the use of the $V(\lambda)$ values adopted by the International Commission on Illumination (CIE) in 1971 (*). The weighting function $V(\lambda)$ was obtained for photopic vision, i.e., for retinas adapted to light. For retinas adapted to darkness, another function $V'(\lambda)$ gives the spectral luminous efficiency for scotopic vision (CIE 1951): this function $V'(\lambda)$ was ratified by the CIPM in September 1976.

Photometric quantities are thereby defined in purely physical terms as quantities proportional to the sum or integral of a spectral power distribution, weighted according to a specified function of wavelength.

Before 1979, the standard lamps then in use were calibrated by comparison with the luminance of a Planckian radiator (a black body) at the temperature of freezing platinum. Since the adoption of the new definition of the candela in 1979, this measurement is carried out by comparison with the monochromatic radiation specified in the definition, or with some other radiation by taking account of $V(\lambda)$ or $V'(\lambda)$.

The standard lamps are incandescent lamps powered by a specified direct current; they provide either a known luminous flux or, in a given direction, a known luminous intensity.

(*) CIE Publications N° 18 (1970), page 43, and N° 15 (1971), page 93; *BIPM Proc.- Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **40**, 1972, Annexe 1. The $V(\lambda)$ [= $\bar{y}(\lambda)$] values are given for wavelengths in 1 nm steps from 360 to 830 nm; they are an improvement on the values in 10 nm steps adopted by the CIPM in 1933, and previously by the CIE in 1924.

INDEX

Numbers in boldface indicate the pages where the definitions of the units are to be found.

- acceleration due to gravity, standard value of (g_n), 84
- ampere, **70**, 86
- amount of substance, 114
- atmosphere, standard, 89

- becquerel, 100
- Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 63-64

- candela, **71**, 96, 101
- candle, new, 85, 97
- Com. International des Poids et Mesures (CIPM), 63-64
- Committees, Consultative, 64
- Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 63
- Convention, Metre, 63
- coulomb, **86**
- cubic decimetre, 93
- curie, 94

- definitions of units, practical realization of the, 106-116
- degree Celsius, 70, 87, 95

- electrical quantities, 110

- farad, **86**
- frequency standard (^{133}Cs), 93, 108

- g_n , 84
- gray, 100, 104

- henry, **86**

- joule, **86**, 86-87

- kelvin, **70**, 95, 97
- kilogram, **69**, 78, 83, 84, 97, 108
- kilogram, multiples of, 78, 97

- legislation on units, 68
- length, 106
- litre, 84, 93, 94 ; symbols, 102
- lumen, **85**

- mass, 108
- mass and weight, 84
- metre, **69**, 83, 85, 90, 103
- micron, 97
- mole, **70**, 99

- newton, 85
- numbers, writing and printing, 88

- ohm, **86**

- pascal, 98
- photometric quantities, 115
- prefixes, SI, 68, 77, 92, 94, 100, 105
- prefixes, SI rules for use of, 77

- quantity, meaning of, 72

- radian, 75
- realization, practical, of the definitions of some important units, 106-116

- second, **69**, 89, 91, 95
- siemens, 98
- sievert, 101, 104
- speed of light (recommended value), 99
- steradian, 75
- substance, amount of, 114
- symbols, for the litre, 102
- symbols, for the base units, 72
- symbols, for derived units with special names, 73
- symbols, writing and use of, 76

- system of quantities, 68
- system of units, international, 90, 91, 97
- system of units, proposal for establishing a practical, 87, 89

- TAI, 98, 109
 - temperature, 113
 - temperature, Celsius, 70
 - temperature, thermodynamic, 70, 95
 - thermodynamic scale with a single fixed point (triple point of water), 86
 - time, 108
 - time, international atomic, 98, 109
 - time, coordinated universal, 100, 109

 - units in use temporarily, 80
 - units, CGS, with special names, 81
 - units, electric, 86
 - units generally deprecated, 82
 - units in use with SI, 79
 - units, legislation on, 68
 - unit of quantity of heat (joule), 86

 - units, photometric, 85
 - units, SI base, 69-71; symbols, 72
 - units, SI derived, 72-75, 92, 96
 - units, SI derived, with special names, 73; symbols, 73
 - units, SI, multiples and submultiples of, 68
 - units, SI supplementary, 75, 92, 102
 - units, SI, the three classes of, 67
 - UTC, 100, 109

 - volt, **86**

 - watt, **86**
 - weber, **86**
 - weight (*see* mass)
-

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal : Imprimeur, 1991, n° 7508
ISBN 92-822-2112-1

ACHEVÉ D'IMPRIMER : AVRIL 1991

Imprimé en France

