

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



*Le Système International
d'Unités
(SI)*

Pavillon de Breteuil, F 92-SÈVRES, France

Dépositaire : OFFILIB, 48, rue Gay-Lussac, F 75-Paris 5^e

—
1970

Rectificatif

- Page 15, Tableau 10, renvoi (h), lire :

(h) Le röntgen l'exposition des rayonnements X ou γ .

- Page 33, paragraphe 3. Temps

6^e alinéa, 3^e ligne : lire "plus grande" (au lieu de "plus petite").

7^e alinéa, dans l'égalité : lire :
 $1 + 300 \times 10^{-10}$.

Le Système International d'Unités (*)

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVERTISSEMENT	3
I. <i>Introduction</i>	5
I.1 Historique	5
I.2 Les trois classes d'unités SI	5
II. <i>Unités SI</i>	6
II.1 Unités de base	6
1. Définitions	6
2. Symboles	9
II.2 Unités dérivées	9
1. Expressions	9
2. Recommandations	11
II.3 Unités supplémentaires	12
III. <i>Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI</i>	13
III.1 Préfixes SI	13
III.2 Recommandations	13
III.3 Le kilogramme	13
IV. <i>Unités en dehors du Système International</i>	14
IV.1 Unités en usage avec le Système International	14
IV.2 Unités admises temporairement	15
IV.3 Unités CGS	15
IV.4 Autres unités	16
ANNEXE I. — Décisions de la Conférence Générale et du Comité International des Poids et Mesures	17
ANNEXE II. — Mise en pratique des définitions des principales unités	32

(*) La traduction anglaise de ce document est publiée sous le titre « The International System of Units », Her Majesty's Stationery Office, London, 1970, et « The International System of Units », U.S. National Bureau of Standards, Special Publication 330, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1970.

AVERTISSEMENT

A la suite de nombreuses demandes, le Bureau International des Poids et Mesures publie ce document dans lequel on a tout d'abord 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 Recommandations d'usage général adoptées par l'Organisation Internationale de Normalisation (I.S.O.).

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 des 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.

J. TERRIEN

*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 (C.G.P.M.), par sa Résolution 6, a chargé le Comité International des Poids et Mesures (C.I.P.M.) :

« 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 (*voir* II.1.2, p. 9) et qui donnait déjà une liste de noms spéciaux d'unités.

La 10^e C.G.P.M. (1954) par sa Résolution 6 décida d'adopter, comme unités de base de ce « système pratique d'unités », les unités des six grandeurs suivantes : longueur, masse, temps, intensité de courant électrique, température thermodynamique et intensité lumineuse (*voir* II.1, p. 6).

La 11^e C.G.P.M. (1960) par sa Résolution 12 adopta finalement 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 (*voir* III.1, p. 13), les unités dérivées et les unités supplémentaires (*voir* II.2, p. 9 et II.3, p. 12) et d'autres indications, établissant ainsi une réglementation d'ensemble pour les unités de mesure.

Dans le présent document, les dénominations « unités SI », « préfixes SI », « unités supplémentaires » sont employées conformément à la Recommandation 1 (1969) du C.I.P.M.

Des améliorations et des extensions à cet ensemble sont déjà nécessaires ; certaines d'entre elles sont à un stade suffisamment avancé pour être incorporées dans le présent document, bien que la C.G.P.M. n'ait pas encore donné son accord définitif ; en particulier, conformément au projet de Résolution approuvé par le C.I.P.M. en octobre 1969, la mole est traitée comme une unité de base.

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 pratique unique, qui pourrait être utilisé dans le monde entier dans les relations internationales, dans l'enseignement et dans la recherche scientifique, décida de baser le Système International sur un choix de six unités bien définies : le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin et la candela (voir II.1, p. 6). Ces unités SI sont appelées *unités de base* ⁽¹⁾.

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. Plusieurs de ces expressions algébriques en fonction des unités de base peuvent être remplacées par des noms et des symboles spéciaux; ceux-ci peuvent être utilisés pour la formation d'autres unités dérivées (voir II.2, p. 9).

Quoiqu'on puisse croire que les unités SI devraient être soit des unités de base, soit des unités dérivées, la 11^e C.G.P.M. (1960) admit une troisième classe d'unités SI, appelées *unités supplémentaires*, pour lesquelles elle n'a pas décidé s'il s'agit d'unités de base ou bien d'unités dérivées (voir II.3, p. 12).

Les unités SI de ces trois classes forment un ensemble cohérent, au sens donné habituellement à « système cohérent d'unités ».

Les multiples et les sous-multiples décimaux 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*, si l'on veut les distinguer de l'ensemble cohérent des unités SI.

II. UNITÉS SI

II.1 Unités de base

1. Définitions

a) *Unité de longueur*. — La 11^e C.G.P.M. (1960) a remplacé la définition du mètre fondée sur le prototype international en platine iridié, en vigueur depuis 1889 et précisée en 1927, par la définition suivante :

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 (11^e C.G.P.M. (1960), Résolution 6).

L'ancien prototype international du mètre qui fut sanctionné par la 1^{re} C.G.P.M. en 1889 est toujours conservé au Bureau International des Poids et Mesures dans les mêmes conditions que celles qui ont été fixées en 1889.

b) *Unité de masse*. — Le prototype international du kilogramme fut sanctionné par la 1^{re} C.G.P.M. (1889) qui déclara que *ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse*.

⁽¹⁾ La 13^e C.G.P.M. (1967) a considéré l'introduction de la mole dans le Système International, et chargé le C.I.P.M. de préparer un projet. En 1969, le C.I.P.M. a approuvé un projet de résolution qui proposera à la 14^e C.G.P.M. (1971) que la mole soit une unité de base (voir II.1.1.g, p. 8).

La 3^e C.G.P.M. (1901), dans une déclaration tendant à faire cesser l'ambiguïté qui existait encore dans l'usage courant sur la signification du terme « poids », confirma que *le kilogramme est l'unité de masse [et non de poids ni de force]; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.*

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

c) *Unité de temps.* — Primitivement la seconde, unité de temps, était définie 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 C.G.P.M. (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 C.G.P.M. (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 C.G.P.M. (1967), Résolution 1).

d) *Unité d'intensité de courant électrique.* — Des unités électriques, dites « internationales », pour l'intensité de 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.

Quoiqu'une opinion unanime de remplacer ces unités « internationales » par des unités dites « absolues » fût déjà évidente à l'occasion de la 8^e C.G.P.M. (1933), la décision formelle de supprimer ces unités « internationales » ne fut prise que par la 9^e C.G.P.M. (1948) qui adopta pour l'ampère, unité d'intensité 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 (C.I.P.M. (1946), Résolution 2 approuvée par la 9^e C.G.P.M. (1948)).

L'expression « unité M.K.S. de force » qui figure dans le texte original a été remplacée ici par « newton » adopté par la 9^e C.G.P.M. (1948, Résolution 7).

e) *Unité de température thermodynamique.* — La définition de l'unité de température thermodynamique a été donnée en fait par la 10^e C.G.P.M. (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 C.G.P.M. (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.

La 13^e C.G.P.M. (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. La température Celsius est généralement exprimée en degrés Celsius (symbole °C). L'unité « degré Celsius » est donc égale à l'unité « kelvin » et un intervalle ou une différence de température Celsius peuvent aussi s'exprimer en degrés Celsius.

f) *Unité d'intensité lumineuse.* — Les unités d'intensité lumineuse fondées sur des étalons à flamme ou à filament incandescent, qui étaient en usage dans différents pays, furent remplacées en 1948 par la « bougie nouvelle ». Cette décision, préparée par la Commission Internationale de l'Éclairage et par le Comité International des Poids et Mesures dès avant 1937, fut prise par le Comité International à sa session de 1946, en vertu des pouvoirs que lui avait conférés la 8^e C.G.P.M. en 1933. La 9^e C.G.P.M. (1948) a ratifié la décision du Comité International et elle a adopté un nouveau nom international, la *candela* (symbole cd), pour désigner l'unité d'intensité lumineuse. Le texte de la définition de la candela, amendé en 1967, est le suivant :

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 (13^e C.G.P.M. (1967), Résolution 5).

g) *Unité de quantité de matière.* — 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 ». Les « poids atomiques » furent d'abord rapportés à celui de l'élément chimique oxygène (16 par convention). Mais tandis que les physiciens séparaient les 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 (U.I.P.P.A.) et l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (U.I.C.P.A.) 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 fixer la masse qui correspond à l'unité de quantité de carbone 12; par un accord international, cette masse a été fixée à 0,012 kg et l'on a donné le nom de *mole* (symbole mol) à l'unité de la grandeur « quantité de matière ».

Suivant les propositions de l'U.I.P.P.A., de l'U.I.C.P.A. et de l'I.S.O., le C.I.P.M. a donné en 1967 et confirmé en 1969 la définition suivante de la mole, unité de quantité de matière :

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.

Remarque. — 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.

Le C.I.P.M. a décidé en 1969 de proposer à la 14^e C.G.P.M. (1971) l'introduction de la mole à titre d'unité de base dans le Système International d'Unités, avec la définition donnée ci-dessus. Cette définition de la mole précise en même temps la nature de la grandeur dont la mole est l'unité ⁽²⁾.

2. Symboles

Les unités de base du Système International sont rassemblées dans le tableau 1 avec leurs noms et leurs symboles (10^e C.G.P.M. (1954), Résolution 6; 11^e C.G.P.M. (1960), Résolution 12, et 13^e C.G.P.M. (1967), Résolution 3; C.I.P.M., 1967 et 1969).

TABLEAU 1
Unités SI de base

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

Le principe général concernant l'écriture des symboles d'unités était déjà adopté par la 9^e C.G.P.M. (1948), Résolution 7, selon laquelle :

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 [pour la première lettre]. Ces symboles ne sont pas suivis d'un point.

Les symboles des unités restent invariables au pluriel.

II.2 Unités dérivées

1. Expressions

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. Plusieurs de ces unités dérivées ont reçu un nom spécial et un

⁽²⁾ Le nom de cette grandeur, adopté par l'U.I.P.P.A., l'U.I.C.P.A., l'I.S.O., 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 la masse; il faut oublier cette signification ancienne, car la masse et la quantité de matière sont deux grandeurs bien distinctes.

symbole particulier, lesquels peuvent être utilisés de nouveau pour exprimer des unités dérivées d'une façon plus simple qu'à partir des unités de base.

On peut donc classer les unités dérivées dans trois groupes. Quelques-unes de ces unités sont données dans les tableaux 2, 3 et 4.

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.....	1 par mètre	m ⁻¹
masse volumique.....	kilogramme par mètre cube	kg/m ³
concentration (de quantité de matière).....	mole par mètre cube	mol/m ³
activité (radioactive).....	1 par seconde	s ⁻¹
volume massique.....	mètre cube par kilogramme	m ³ /kg
luminance.....	candela par mètre carré	cd/m ²

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 · kg · s ⁻²
pression.....	pascal ^(a)	Pa	N/m ²	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
énergie, travail, quantité de chaleur.....	joule	J	N · m	m ² · kg · s ⁻²
puissance, flux énergétique.....	watt	W	J/s	m ² · kg · s ⁻³
quantité d'électricité, charge électrique.....	coulomb	C	A · s	s · A
tension électrique, potentiel électrique.....	volt	V	W/A	m ² · kg · s ⁻³ · A ⁻¹
capacité électrique.....	farad	F	C/V	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
résistance électrique.....	ohm	Ω	V/A	m ² · kg · s ⁻³ · A ⁻²
conductance.....	siemens ^(a)	S	A/V	m ⁻² · kg ⁻¹ · s ³ · A ²
flux d'induction magnétique.....	weber	Wb	V · s	m ² · kg · s ⁻² · A ⁻¹
induction magnétique.....	tesla	T	Wb/m ²	kg · s ⁻² · A ⁻¹
inductance.....	henry	H	Wb/A	m ² · kg · s ⁻² · A ⁻²
flux lumineux.....	lumen	lm		cd · sr
éclairage lumineux.....	lux	lx		m ⁻² · cd · sr ^(b)

^(a) Le C.I.P.M. a décidé en 1969 de soumettre ce nom spécial et son symbole à l'approbation de la 14^e C.G.P.M.

^(b) Dans ces deux expressions, le stéradian (sr) est traité comme une unité de base.

TABLEAU 4
Exemples d'unités SI dérivées
que l'on exprime 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	mètre newton	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
tension superficielle	newton par mètre	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
densité de flux thermique, éclairage énergétique	watt par mètre carré	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
capacité thermique, entropie	joule par kelvin	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
chaleur 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) volu- mique	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	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
densité de courant	ampère par mètre carré	A/m ²	
champ magnétique	ampère par mètre	A/m	
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, chaleur molaire	joule par mole kelvin	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

Remarque. — Les valeurs de certaines grandeurs, dites sans dimensions, comme par exemple l'indice de réfraction, la perméabilité relative ou la permittivité relative, sont exprimées par des nombres purs. L'unité SI correspondante est, dans ce cas, le rapport de deux unités SI égales et peut être exprimée par le nombre 1.

2. Recommandations

L'Organisation Internationale de Normalisation (I.S.O.) a donné des recommandations additionnelles pour uniformiser les modalités d'emploi des unités, en particulier celles du Système International (voir la série de Recommandations

R 31 et la Recommandation R 1000 élaborées par le Comité Technique ISO/TC 12 « Grandeurs, unités, symboles, facteurs de conversion et tables de conversion »).

Suivant ces recommandations :

a) Le produit de deux ou plusieurs unités est indiqué de préférence par un point comme signe de multiplication. Ce point peut être supprimé dans le cas où aucune confusion n'est possible avec un autre symbole d'unité,

par exemple : $N \cdot m$ ou $N\ m$ mais non pas : mN

b) Quand une unité dérivée est formée en divisant une unité par une autre, on peut utiliser la barre oblique (/), la barre horizontale ou bien des puissances négatives,

par exemple : m/s , $\frac{m}{s}$ 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 puissances négatives ou des parenthèses doivent être utilisées,

par exemple : m/s^2 ou $m \cdot s^{-2}$ mais non pas : $m/s/s$
 $m \cdot kg/(s^2 \cdot A)$ ou $m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$ $m \cdot kg/s^2/A$

II.3 Unités supplémentaires

Pour quelques unités du Système International, la Conférence Générale n'a pas ou n'a pas encore décidé s'il s'agit d'unités de base ou bien d'unités dérivées. Ces unités SI sont placées dans la troisième classe, dite des « unités supplémentaires », et l'on est libre de les traiter soit comme des unités de base, soit comme des unités dérivées.

Cette classe ne contient actuellement que deux unités purement géométriques : l'unité SI d'angle plan, le *radian*, et l'unité SI d'angle solide, le *stéradian* (11^e C.G.P.M. (1960), Résolution 12).

TABLEAU 5
Unités SI supplémentaires

Grandeur	Unité SI	
	Nom	Symbole
angle plan	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

Le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon.

Le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

(Recommandation I.S.O. R 31, 1^{re} Partie, 2^e édition, décembre 1965).

Les unités supplémentaires sont utilisées pour obtenir des unités dérivées. Des exemples 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

III. MULTIPLES ET SOUS-MULTIPLES DÉCIMAUX DES UNITÉS SI

III.1 Préfixes SI

La 11^e C.G.P.M. (1960, Résolution 12) a adopté une première série de noms et symboles de préfixes pour former les multiples et sous-multiples décimaux des unités SI. Les préfixes pour 10⁻¹⁵ et 10⁻¹⁸ furent ajoutés par la 12^e C.G.P.M. (1964, Résolution 8).

TABLEAU 7
Préfixes SI

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
10 ¹²	téra	T	10 ⁻¹	déci	d
10 ⁹	giga	G	10 ⁻²	centi	c
10 ⁶	méga	M	10 ⁻³	milli	m
10 ³	kilo	k	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ²	hecto	h	10 ⁻⁹	nano	n
10 ¹	déca	da	10 ⁻¹²	pico	p
			10 ⁻¹⁵	femto	f
			10 ⁻¹⁸	atto	a

III.2 Recommandations

L'I.S.O. a recommandé que l'on observe les règles suivantes dans l'emploi des préfixes SI :

a) Les symboles des préfixes sont imprimés en caractères romains (droits), sans espace entre le symbole du préfixe et le symbole de l'unité.

b) Si un symbole contenant un préfixe est affecté d'un exposant, cela indique que le multiple ou le sous-multiple de l'unité est élevé à la puissance exprimée par l'exposant,

$$\text{par exemple : } 1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3 \\ 1 \text{ cm}^{-1} = 10^2 \text{ m}^{-1}$$

c) Les préfixes composés sont à éviter,

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

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 » (C.I.P.M. (1967), Recommandation 2).

IV. UNITÉS EN DEHORS DU SYSTÈME INTERNATIONAL

IV.1 Unités en usage avec le Système International

Le C.I.P.M. (1969) a reconnu que les utilisateurs du SI auront besoin d'employer conjointement certaines unités qui sont en dehors du Système International, mais qui sont largement répandues. Ces unités jouent un rôle si important qu'il est nécessaire de les retenir pour l'usage général avec le Système International d'Unités. Elles sont données dans le tableau 8.

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 ^(a)	l	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonne ^(a)	t	1 t = 10 ³ kg

^(a) Le symbole de cette unité est inclus dans la Résolution 7 de la 9^e C.G.P.M. (1948). La définition du litre est dans la Résolution 6 de la 12^e C.G.P.M. (1964).

De même, il est nécessaire d'admettre quelques autres unités en dehors du Système International, dont l'emploi est utile dans des domaines spécialisés de la recherche scientifique, 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 dans des domaines spécialisés

Nom	Symbole	Définition
électronvolt	eV	^(a)
unité de masse atomique (unifiée)	u	^(b)
unité astronomique	UA	^(c)
parsec	pc	^(d)

^(a) 1 électronvolt est l'énergie acquise par un électron en traversant une différence de potentiel de 1 volt dans le vide; 1 eV = 1,602 19 × 10⁻¹⁹ J approximativement.

^(b) L'unité de masse atomique (unifiée) est égale à la fraction 1/12 de la masse d'un atome du nucléide ¹²C; 1 u = 1,660 53 × 10⁻²⁷ kg approximativement.

^(c) L'unité astronomique de distance est la longueur du rayon de l'orbite circulaire non perturbée d'un corps de masse négligeable en mouvement autour du Soleil avec une vitesse angulaire sidérale de 0,017 202 098 950 radian par jour de 86 400 secondes des éphémérides. Dans le Système de constantes astronomiques de l'Union Astronomique Internationale, la valeur adoptée est: 1 UA = 149 600 × 10⁶ m.

En anglais on emploie le symbole AU.

^(d) 1 parsec est la distance à laquelle 1 unité astronomique sous-tend un angle de 1 seconde d'arc; donc, approximativement, 1 pc = 206 265 UA = 30 857 × 10¹³ m.

IV.2 Unités admises temporairement

Le C.I.P.M. (1969) a estimé préférable de maintenir temporairement les unités contenues dans le tableau 10, pour qu'elles soient employées conjointement avec les unités du Système International, en raison de la force des usages existants.

TABLEAU 10
*Unités à maintenir temporairement
avec le Système International*

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
mille marin ^(a)		1 mille marin = 1 852 m
nœud		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 = 10 ⁵ Pa
atmosphère normale ^(e) ..	atm	1 atm = 101 325 Pa
gal ^(f)	Gal	1 Gal = 1 cm/s ² = 10 ⁻² m/s ²
curie ^(g)	Ci	1 Ci = 3,7 × 10 ¹⁰ s ⁻¹
röntgen ^(h)	R	1 R = 2,58 × 10 ⁻⁴ C/kg
rad ⁽ⁱ⁾	rad	1 rad = 10 ⁻² J/kg

^(a) Le mille marin 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 (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 1879, p. 41).

^(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 C.G.P.M. (1948).

^(e) Résolution 4 de la 10^e C.G.P.M. (1954).

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

^(g) Le curie est une unité spéciale employée en physique nucléaire pour exprimer l'activité des radionucléides (12^e C.G.P.M. (1964), Résolution 7).

^(h) Le röntgen est une unité spéciale employée pour exprimer l'exposition d'ionisation de rayonnements ionisants.

⁽ⁱ⁾ Le rad est une unité spéciale employée pour exprimer la dose absorbée de rayonnements ionisants. Lorsque le mot rad peut entraîner une confusion avec le symbole du radian, on peut utiliser rd comme symbole du rad.

IV.3 Unités CGS

Le C.I.P.M. 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 ⁽³⁾. De telles unités sont mentionnées dans le tableau 11.

⁽³⁾ 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.

TABLEAU 11
Unités CGS ayant des noms spéciaux

Nom	Symbole	Valeur en unité SI
erg ^(a)	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
dyne ^(a)	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁶ 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 $\frac{1\ 000}{4\pi}$ A/m
maxwell ^(b)	Mx	1 Mx correspond à 10 ⁻⁸ Wb
stilb ^(a)	sb	1 stilb = 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 C.G.P.M. (1948).

^(b) Cette unité fait partie du Système CGS dit « électromagnétique » à trois dimensions et ne peut pas être comparée strictement à l'unité correspondante du Système International qui est à quatre dimensions.

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 C.I.P.M. 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 ⁻¹⁶ m
carat métrique ^(a)	1 carat métrique = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
torr	1 torr = $\frac{101\ 325}{760}$ Pa
kilogramme-force (kgf)	1 kgf = 9,806 65 N
calorie (cal)	1 cal = 4,186 8 J ^(b)
micron (μ) ^(c)	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m
unité X ^(d)	
stère (st) ^(e)	1 st = 1 m ³
gamma (γ)	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
γ ^(f)	1 γ = 1 μg = 10 ⁻⁹ kg
λ ^(g)	1 λ = 1 μl = 10 ⁻⁶ l

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

^(b) Cette valeur est celle de la calorie dite « I.T. » (5th International Conference on Properties of Steam, Londres, 1956).

^(c) Ce nom d'unité et son symbole, qui avaient été adoptés par le Comité International en 1879 (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 1879, p. 41) et repris dans la Résolution 7 de la 9^e C.G.P.M. (1948), ont été supprimés par la 13^e C.G.P.M. (1967, Résolution 7).

^(d) Cette unité spéciale fut employée pour exprimer les longueurs d'onde des rayons X; 1 unité X = 1,002 × 10⁻⁴ nm approximativement.

^(e) Cette unité spéciale, employée dans le mesurage du bois de chauffage, a été adoptée par le Comité International en 1879 avec le symbole « s » (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 1879, p. 41). La 9^e C.G.P.M. (1948, Résolution 7) a changé ce symbole en « st ».

^(f) Ce symbole est mentionné dans les *Procès-Verbaux du C.I.P.M.*, 1880, p. 56.

^(g) Ce symbole est mentionné dans les *Procès-Verbaux du C.I.P.M.*, 1880, p. 30.

ANNEXE I

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

C.R. : *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures* (C.G.P.M.).

P.V. : *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures* (C.I.P.M.).

1^{re} C.G.P.M., 1889

— *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 :

.....

3° C.G.P.M., 1901

— *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°

— *Déclaration relative à l'unité de masse et à la définition du poids; valeur 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⁾ *Note du B. I. P. M.* Cette « valeur normale » conventionnelle de référence ($g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$) à utiliser pour la réduction à la pesanteur normale des observations exécutées en un lieu donné de la Terre a été confirmée à nouveau en 1913 par la 5^e C.G.P.M. (C.R., p. 44).

7^e C.G.P.M., 1927

— 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.

C.I.P.M., 1946

— 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.

— 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 (*).

(*) Il a été proposé de donner le nom de « newton » à l'unité de force MKS.

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.

(3) Les deux définitions contenues dans cette Résolution ont été ratifiées par la 9^e C.G.P.M. (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 C.G.P.M. (1948) (C.R., p. 49), qui a en outre adopté le nom *newton* (Résolution 7).

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 C.G.P.M., 1948

— *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 0,010 0 degré à celle du point triple de l'eau pure.

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

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

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.

— *Adoption de « degré Celsius »*

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

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

— *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.

— *Écriture des symboles d'unités et des nombres*

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 ».

10^e C.G.P.M., 1954

— *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.

— *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* (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

C.I.P.M., 1956

— *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° 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 ».

— *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^e C.G.P.M. (1960)].

2° que soient employées les unités de ce système énumérées au tableau suivant, sans préjudice d'autres unités qu'on pourrait ajouter à l'avenir :

[Suit le tableau des unités reproduit dans le paragraphe 4° de la Résolution 12 de la 11^e C.G.P.M. (1960)].

11^e C.G.P.M., 1960

— *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.

RÉSOLUTION 7

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

invite le Comité International

1° à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre ^(*);

2° à choisir des étalons secondaires de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi;

3° à poursuivre les études entreprises en vue d'améliorer les étalons de longueur.

(*) Voir à l'Annexe II, p. 32, la Recommandation adoptée par le C.I.P.M. à ce sujet.

— 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 ».

— 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 plan	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

— *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.

C.I.P.M., 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 C.G.P.M., 1964

— *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 C.I.P.M. (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* (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^o *abroge* la définition du litre donnée en 1901 par la Troisième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

— 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'acti-
vité, avec la valeur $3,7 \times 10^{10} s^{-1}$. Le symbole de cette unité est Ci.

— Préfixes 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^o, les deux nouveaux préfixes suivants :

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

13^e C.G.P.M., 1967-1968

— Unité de temps du SI (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 métro-
logie,

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

que cet étalon de fréquence est maintenant suffisamment éprouvé et suffi-
samment 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^o 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 correspon-

dant 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.

— *Unité 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) (7),

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.

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 ».

(7) « 1° L'unité degré Kelvin (symbole °K) peut être employée aussi bien pour une différence de deux températures thermodynamiques que pour la température thermodynamique elle-même.

« 2° Si l'on juge nécessaire de supprimer l'indication du nom Kelvin, il est recommandé d'employer le symbole international « deg » pour l'unité de différence de température. (Le symbole « deg » est lu, par exemple : « degré » en français, « degree » en anglais, « gradous » (градус) en russe, « Grad » en allemand, « graad » en hollandais) ».

— *Unité 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. »

— *Unités 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}

— *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° le nom d'unité « micron », et le symbole « μ » qui fut attribué à cette unité et qui est devenu un préfixe;

2° le nom d'unité « bougie nouvelle ».

C.I.P.M., 1967

— *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° de la Résolution 12 de la Onzième Confé-

rence 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 ».

C.I.P.M., 1969

— *Système International d'Unités: modalités d'application de la Résolution 12 de la 11^e C.G.P.M. (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^o 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^o 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^o 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.

— *Unité de quantité de matière (mole)*

Projet de résolution ⁽⁸⁾

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^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; son symbole est mol.

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.

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

⁽⁸⁾ Le C.I.P.M. (octobre 1969) a accepté de présenter à la 14^e C.G.P.M. en 1971 ce projet de résolution proposé par le Comité Consultatif des Unités (C.C.U., 2^e session, 1969, p. U 20).

ANNEXE II

Mise en pratique des définitions des principales unités

1. Longueur

Le C.I.P.M. a adopté en 1960 la Recommandation suivante qui spécifie les caractéristiques de la lampe à décharge produisant la radiation étalon du krypton 86 :

Conformément au paragraphe 1 de la Résolution 7 adoptée par la Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1960), le Comité International des Poids et Mesures recommande que la radiation du krypton 86 adoptée comme étalon fondamental de longueur soit réalisée au moyen d'une lampe à décharge à cathode chaude contenant du krypton 86 d'une pureté non inférieure à 99 pour cent, en quantité suffisante pour assurer la présence de krypton solide à la température de 64 °K, cette lampe étant munie d'un capillaire ayant les caractéristiques suivantes : diamètre intérieur 2 à 4 millimètres, épaisseur des parois 1 millimètre environ.

On estime que la longueur d'onde de la radiation émise par la colonne positive est égale, à 1 cent-millionième (10^{-8}) près, à la longueur d'onde correspondant à la transition entre les niveaux non perturbés, lorsque les conditions suivantes sont satisfaites :

1° le capillaire est observé en bout de façon que les rayons lumineux utilisés cheminent du côté cathodique vers le côté anodique;

2° la partie inférieure de la lampe, y compris le capillaire, est immergée dans un bain réfrigérant maintenu à la température du point triple de l'azote, à 1 degré près;

3° la densité du courant dans le capillaire est $0,3 \pm 0,1$ ampère par centimètre carré.

(*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 28, 1960, p. 71; *Comptes rendus 11^e C.G.P.M.*, 1960, p. 85)

L'appareillage annexe nécessaire comprend : les sources stabilisées de courant pour l'alimentation électrique de la lampe, un cryostat étanche, un thermomètre utilisable au voisinage de 63 K, une pompe à vide, un monochromateur (pour isoler la radiation) ou des filtres interférentiels spéciaux.

La longueur d'onde de la radiation étalon, reproductible à 10^{-8} d'après les spécifications ci-dessus, pourrait l'être à environ 10^{-9} au prix de spécifications plus rigoureuses.

D'autres radiations du krypton 86 et plusieurs radiations du mercure 198 et du cadmium 114 sont recommandées comme étalons secondaires (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 31, 1963, Recommandation 1, p. 26 et *Comptes rendus 12^e C.G.P.M.*, 1964, p. 18).

La longueur d'onde de ces radiations varie avec la pression, la température et la composition de l'air dans lequel elles se propagent; il est donc nécessaire en général de mesurer sur place l'indice de réfraction de l'air.

Pour mesurer des étalons à bouts ou à traits on utilise ces radiations dans un comparateur interférentiel, instrument complexe comprenant une partie mécanique, une partie d'optique interférentielle et une partie thermométrique.

2. Masse

L'étalon primaire de l'unité de masse est le prototype international du kilogramme confié au Bureau International des Poids et Mesures. La masse d'étalons secondaires de 1 kg, en platine iridié ou en acier inoxydable, est comparée à la masse du prototype au moyen de balances dont la précision peut atteindre ou dépasser 10^{-8} .

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

3. Temps

Quelques laboratoires spécialisés construisent eux-mêmes l'appareillage nécessaire pour produire des oscillations électriques à la fréquence de vibration de l'atome de césium 133 qui définit la seconde. Cet appareillage comprend entre autres : un oscillateur à quartz, des multiplicateurs et synthétiseurs de fréquence, un klystron, des détecteurs de phase, un appareil à jet atomique de césium dans le vide avec des cavités résonnantes, des champs magnétiques homogènes et inhomogènes et un détecteur d'ions.

Des ensembles complets produisant cette fréquence sont disponibles commercialement.

Par démultiplication de fréquence, on obtient des impulsions à la fréquence voulue, par exemple 1 Hz, 1 kHz, etc.

La stabilité et la reproductibilité peuvent être meilleures que 10^{-11} .

Des émissions hertziennes diffusent des ondes entretenues dont la fréquence est connue avec une précision du même ordre.

Des signaux horaires sont aussi diffusés par voie hertzienne. Ces signaux sont en général donnés en ce moment dans une échelle de temps, appelé Temps Universel Coordonné (TUC), dans laquelle la seconde est plus petite que la seconde définie par la C.G.P.M., afin que le jour de 86 400 secondes soit à peu près égal à la durée actuelle d'une rotation de la Terre (on sait que cette durée est irrégulière).

Depuis 1966, par exemple, on admet par convention le décalage (ou « offset ») suivant :

$$\frac{1 \text{ seconde (TUC)}}{1 \text{ seconde (vraie)}} = 1 - 300 \times 10^{-10}.$$

De plus, la première minute d'un mois est parfois diminuée ou augmentée d'un ou plusieurs dixièmes de seconde pour rattraper l'avance ou le retard de la rotation de la Terre.

La fréquence des ondes porteuses, exprimée en hertz, est en général un nombre rond diminué selon le décalage indiqué ci-dessus, afin de maintenir la relation de phase entre l'onde et les signaux horaires. On diffuse aussi des ondes à fréquence non décalée.

Il existe des étalons de fréquence autres que l'étalon à césium, par exemple le maser à hydrogène, l'horloge à rubidium, les étalons de fréquence et horloges à quartz, etc. Leur fréquence est contrôlée par comparaison à un étalon à césium, soit directement, soit par l'intermédiaire des émissions hertziennes.

4. Grandeurs électriques

Les mesures électriques dites « absolues », c'est-à-dire par référence à la définition de l'unité, sont réservées à des laboratoires exceptionnellement spécialisés.

L'intensité d'un courant électrique est obtenue en ampères par la mesure de la force entre deux enroulements conducteurs, de forme et de dimensions mesurées, parcourus par le courant à mesurer.

L'ohm, le farad et le henry étant reliés avec précision par des comparaisons d'impédance à une fréquence connue, ces unités sont déterminées en valeur absolue à partir de la valeur calculée 1) de l'inductance propre d'une bobine, ou de l'inductance mutuelle de deux bobines, en fonction de leurs caractéristiques géométriques, ou 2) de la variation de la capacité électrique d'un condensateur en fonction de la variation de longueur de ses armatures (méthode de Thompson-Lampard).

Le volt se déduit de l'ampère et de l'ohm.

La précision optimale de ces mesures est de 1×10^{-6} à 3×10^{-6} .

Les résultats des mesures absolues sont conservés au moyen d'étalons secondaires qui sont par exemple :

1° des bobines en fil de manganine (étalons de résistance);

2° des éléments galvaniques au sulfate de cadmium (étalons de force électromotrice);

3° des condensateurs (étalons de capacité électrique, de 10 pF par exemple).

L'application de techniques récentes offre en outre la possibilité de contrôler la permanence des étalons secondaires qui conservent les unités électriques : mesure du coefficient gyromagnétique du proton γ'_p pour l'ampère et mesure du rapport h/e par l'effet Josephson pour le volt.

5. Température

Les mesures absolues de température, conformes à la définition de l'unité de température thermodynamique, le kelvin, font appel à la thermodynamique, par exemple au thermomètre à gaz.

La précision optimale est de l'ordre de 10^{-6} à 273,16 K; elle décroît aux températures plus hautes et plus basses.

L'Échelle Internationale Pratique de Température adoptée par le C.I.P.M. en 1968 est en accord avec les résultats thermodynamiques les meilleurs connus à ce moment. Le texte de cette Échelle (qui remplace l'Échelle de 1948, amendée en 1960) est publié dans *Comité Consultatif de Thermométrie*, 8^e session, 1967, Annexe 18, et *Comptes rendus 13^e C.G.P.M.*, 1967-1968, Annexe 2; la traduction anglaise est publiée dans *Metrologia*, 5, N° 2, 1969, p. 35.

Les principaux instruments utilisés pour la mesure des températures dans l'Échelle Internationale sont le thermomètre à résistance de platine, le thermocouple platine rhodié (10 % de rhodium)/ platine et le pyromètre optique monochromatique. Ces instruments sont étalonnés à un certain nombre de températures reproductibles, appelées « points fixes de définition », dont la valeur est assignée par convention.

6. Grandeurs photométriques

Les mesures photométriques absolues, c'est-à-dire par comparaison à la luminance du corps noir à la température de congélation du platine, sont réservées à quelques laboratoires spécialisés. La précision de ces mesures absolues est un peu meilleure que 1 pour cent.

Les résultats des mesures absolues sont conservés au moyen de lampes à incandescence alimentées d'une façon spécifiée par un courant électrique continu. Ces lampes constituent des étalons d'intensité ou de flux lumineux.

La méthode approuvée en 1937 par le Comité International des Poids et

Mesures (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 18, p. 237) pour déterminer les valeurs des grandeurs photométriques des sources lumineuses ayant une couleur autre que celle de l'étalon primaire, consiste à utiliser un procédé tenant compte des « efficacités lumineuses relatives spectrales » $V(\lambda)$ adoptées par le Comité International en 1933 (alors appelées « facteurs de visibilité (ou de luminosité) relative », et recommandées dès 1924 par la Commission Internationale de l'Éclairage).

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.

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

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

Par exemple, l'atome de fluor ^{19}F et l'atome de carbone ^{12}C ont des masses qui sont dans 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'atomes 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 précision, mais le rapport $m(\text{B})/m(^{12}\text{C})$ peut être déterminé avec précision. 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

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

la substance B est donnée par la formule générale :

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

Il existe d'autres méthodes, fondées sur les lois de la physique et de la physico-chimie, 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 $0,0224 \text{ m}^3$ à $T = 273,16 \text{ K}$ et $p = 101\,325 \text{ N/m}^2$); 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 1 mole de $\frac{1}{2}$ 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.

IMPRIMERIE DURAND
28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1970, n° 1019
Dépôt légal, Éditeur, 1970, n° 9
ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 25-11-1970

Imprimé en France