

M/P

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



*Le Système International
d'Unités
(SI)*

4^e Édition

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France
Dépositaire : OFFILIB, 48, rue Gay-Lussac, F-75005 Paris

—
1981

*Le Système International
d'Unités
(SI)*

4^e Édition

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

—
1981

ISBN 92-822-2067-2

Le Système International d'Unités *

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVERTISSEMENT	4
I. <i>Introduction</i>	5
I.1. Historique	5
I.2. Les trois classes d'unités SI	5
I.3. Les préfixes SI	6
I.4. Système de grandeurs	6
I.5. Législations sur les unités	6
II. <i>Unités SI</i>	7
II.1. Unités SI de base	7
II.1.1. Définitions	7
II.1.2. Symboles	10
II.2. Unités SI dérivées	10
II.3. Unités SI supplémentaires	13
II.4. Règles d'écriture et d'emploi des symboles des unités SI	14
III. <i>Multiples et sous-multiples décimaux des unités SI</i>	15
III.1. Préfixes SI	15
III.2. Règles d'emploi des préfixes SI	15
III.3. Le kilogramme	16
IV. <i>Unités en dehors du Système International</i>	17
IV.1. Unités en usage avec le Système International	17
IV.2. Unités maintenues temporairement	18
IV.3. Unités CGS	19
IV.4. Autres unités	20
ANNEXE I. — Décisions de la Conférence Générale et du Comité International des Poids et Mesures	21
ANNEXE II. — Mise en pratique des définitions des principales unités	41
ANNEXE III. — Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	46
INDEX	49

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

AVERTISSEMENT DE LA 4^e ÉDITION

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 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 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.

Cette 4^e édition est une révision de la 3^e édition (1977); elle tient compte des décisions de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1979), du Comité International des Poids et Mesures (1977, 1978, 1980) et des amendements apportés par le Comité Consultatif des Unités (1978, 1980).

(Janvier 1981)

P. GIACOMO
*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 pratique 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. 7). 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. 10).

La 11^e CGPM (1960) a admis une troisième classe d'unités SI, appelées *unités supplémentaires*, dont elle n'a pas précisé la nature (voir II.3, p. 13).

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 aucun 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 a une seule unité SI, même si cette unité peut être exprimée sous différentes formes, mais que l'inverse n'est pas vrai : une même unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes (voir p. 12).

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. 15). 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) « Unités de mesure » (Recueil de Normes ISO 2), ISO, Genève, 1979, 243 pages.

II. UNITÉS SI

II.1. Unités SI de base

II.1.1. Définitions

a) unité de longueur
(mètre)

La 11^e CGPM (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 CGPM (1960), Résolution 6).

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. 22).

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 d'intensité de courant électrique (ampère)

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.

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 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 (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

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° *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° *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
intensité de 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	1 par mètre	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).

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. 8, e, Remarque.

^(b) Voir II.3., p. 13.

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	$m^2 \cdot s^{-3}$

Ainsi qu'on l'a mentionné à la fin du paragraphe I.2 (p. 6), une même unité SI peut correspondre à plusieurs grandeurs différentes; des exemples sont donnés dans les tableaux ci-dessus où l'énumération des grandeurs citées ne doit pas être considérée comme limitative. 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.

Bien qu'une unité dérivée puisse s'exprimer de plusieurs façons équivalentes en utilisant des noms d'unités de base et des noms spéciaux d'unités dérivées, le CIPM ne voit pas d'inconvénients à l'emploi de certaines combinaisons ou de

certains noms spéciaux afin de faciliter la distinction entre des grandeurs ayant la même dimension. Par exemple, on emploie le hertz pour la fréquence, plutôt que la seconde à la puissance moins un, et le newton mètre, plutôt que le joule, pour le moment d'une force.

Dans le domaine des rayonnements ionisants, on emploie de même le becquerel pour l'activité, plutôt que la seconde à la puissance moins un, et le gray ou le sievert, selon la grandeur considérée, plutôt que le joule par kilogramme.

Remarque. — Les valeurs de certaines grandeurs, dites sans dimension, 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 alors le rapport de deux unités SI égales et elle 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).

TABLEAU 5
Unités SI supplémentaires

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

Au moment de l'introduction du Système International, la 11^e CGPM avait laissé ouverte la question de la nature de ces unités supplémentaires.

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, le CIPM (1980) a précisé que, dans le Système International, les grandeurs angle plan et angle solide doivent être considérées comme des grandeurs dérivées sans dimension et que, par conséquent, les unités supplémentaires radian et stéradian sont des unités dérivées sans dimension qui peuvent être utilisées ou non dans les expressions des unités dérivées.

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,

par exemple : N·m, N.m 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,

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 exposants négatifs ou des parenthèses doivent être utilisés,

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

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).

TABLEAU 7
Préfixes SI

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

III.2. Règles d'emploi des préfixes SI

Suivant 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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*

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

^(a) L'électronvolt est l'énergie cinétique 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 1/12 de la masse d'un atome du nucléide ¹²C; 1 u = 1,660 57 × 10⁻²⁷ kg approximativement.

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 = 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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 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⁽³⁾. 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
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 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.

⁽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.

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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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 » (*Procès-Verbaux CIPM*, 1879, p. 41). La 9^e CGPM (1948, Résolution 7) a changé ce symbole en « st ».

^(g) Ce symbole est mentionné dans les *Procès-Verbaux du CIPM*, 1880, p. 56.

^(h) Ce symbole est mentionné dans les *Procès-Verbaux du CIPM*, 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 28 : 11° CGPM, Résolution 6).

3° 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 32 : 12° 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° 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 28 : 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 34 : 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 0,010 0 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 35 la Résolution 7 de la 13^e CGPM (1967).

** Un second symbole, L, a été adopté en 1979 (voir page 39 : 16^e CGPM, Résolution 6).

*** Nom et symbole changés en 1967 (voir page 33 : 13^e CGPM, Résolution 3).

**** Décision abrogée en 1967 (voir page 33 : 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 34 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 33 : 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° 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 33 : 13^e 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^o que soit désigné comme « Système International d'Unités », le système fondé sur les unités de base adoptées par la Dixième Conférence Générale, qui sont :

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

2^o 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^o de la Résolution 12 de la 11^e CGPM (1960)].

11^e 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^o 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^o 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 ⁽⁷⁾;

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.

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 33 : 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,

(7) Voir à l'Annexe II, p. 41, la Recommandation adoptée par le CIPM à ce sujet.

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 33 : 13° CGPM, Résolution 3).

** Une septième unité de base, la mole, a été adoptée en 1971 par la 14° CGPM (Résolution 3, voir page 37).

*** Voir pages 32 et 38 les quatre nouveaux préfixes adoptés par les 12° CGPM (1964), Résolution 8 et 15° CGPM (1975), Résolution 10.

**** Voir page 34 les autres unités ajoutées par la 13° 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 38 : 15^e CGPM, Résolution 8); $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

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^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 correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ».

2^o 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^o 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.

RÉSOLUTION 4

kelvin La Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

décide d'exprimer cette définition de la façon suivante :

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

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 38 : 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 38 : 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 40 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 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

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.

⁽⁸⁾ En prévision de cette demande, le Comité International des Poids et Mesures avait chargé son Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde de préparer une définition du Temps Atomique International. 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.* »

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

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⁽¹⁾.

} Résolution 9

⁽¹⁾ 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.

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

RÉSOLUTION 10

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

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

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

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.

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.

CIPM, 1980

unités SI supplémentaires

– Unités SI supplémentaires (radian et stéradian) (P.V., 48)

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,

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.

ANNEXE II

Mise en pratique des définitions des principales unités

1. Longueur

Le CIPM 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 CIPM*, 28, 1960, p. 71; *Comptes rendus 11^e CGPM*, 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.

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

Deux radiations monochromatiques, l'une dans la région visible, l'autre dans la région infrarouge du spectre, produites par des lasers à hélium-néon asservis sur une raie d'absorption saturée de l'iode ou du méthane, sont recommandées comme étalons de longueur d'onde avec les valeurs suivantes (*Procès-Verbaux CIPM*, 41, 1973, p. 112).

Raie	Longueur d'onde dans le vide
Méthane, P(7), bande ν_3	$3\,392\,231,40 \times 10^{-12}$ m
Iode 127, R(127), bande 11-5 composante i	$632\,991,399 \times 10^{-12}$ m

Ces radiations sont reproductibles avec une incertitude de l'ordre de 10^{-10} en valeur relative; la valeur en mètre de leur longueur d'onde a une incertitude imposée par l'indétermination de l'étalon (la longueur d'onde de la radiation du ^{86}Kr) estimée à $\pm 4 \times 10^{-9}$. En mesurant la fréquence des battements entre des radiations voisines (diverses composantes du multiplet hyperfin de l'iode par exemple), on obtient une valeur très précise des différences de longueur d'onde.

La longueur d'onde de toutes 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.

La longueur d'onde de la raie du méthane citée plus haut, multipliée par sa fréquence (mesurée par comparaison à celle de la transition du ^{133}Cs de la définition de la seconde) conduit à la valeur de la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide $c = 299\,792\,458$ m/s, recommandée par la 15^e CGPM (Résolution 2).

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} . Dans le cas d'étalons en acier inoxydable, l'exactitude de la comparaison dépend de l'exactitude avec laquelle est connue la correction due à la poussée de l'air.

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 de recherche construisent eux-mêmes l'appareillage pour produire des oscillations électriques dont la fréquence est dans un rapport connu avec la fréquence de la transition de l'atome de césium 133 qui définit la seconde. On obtient ainsi des impulsions à la fréquence voulue, par exemple 1 Hz, 1 kHz, etc. Des étalons de temps à césium sont aussi disponibles commercialement.

L'exactitude correspond, dans le cas des appareils les mieux étudiés, à une incertitude de 10^{-13} et même 10^{-14} , en valeur relative.

Des émissions hertziennes diffusent des ondes entretenues dont la fréquence est connue avec des incertitudes de 10^{-11} à 10^{-12} , en valeur relative.

Il existe des horloges et des générateurs de fréquence de grande stabilité autres que les appareils à césium, par exemple le maser à hydrogène, les horloges à rubidium et à quartz, etc. Leur fréquence doit être étalonnée par comparaison avec un étalon de temps à césium, soit directement, soit par l'intermédiaire d'émissions hertziennes.

Les signaux horaires diffusés par voie hertzienne sont donnés dans une échelle de temps appelée Temps Universel Coordiné (UTC) dont l'emploi a été recommandé en 1975 par la 15^e CGPM (Résolution 5). UTC est défini de telle façon qu'il diffère du Temps Atomique International (TAI) ⁽¹⁾ 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 UTC qui comportait auparavant un décalage de fréquence; cette différence peut être

⁽¹⁾ Voir à l'Annexe I, p. 37 (note ⁽⁸⁾), la définition du TAI donnée par le CIPM conformément à la demande de la 14^e CGPM (1971, Résolution 1).

modifiée de 1 seconde par l'emploi d'une *seconde intercalaire* (« leap second ») positive ou négative à la fin d'un mois de 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 UTC reste en accord avec le temps défini par la rotation de la Terre avec une approximation meilleure que $0,9 \text{ s}^{(2)}$. 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).

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.

L'incertitude sur la détermination absolue du farad est de quelques 10^{-8} ; elle est de quelques 10^{-6} sur la détermination absolue de l'ampère.

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 de 1968, édition amendée de 1975, adoptée par la 15^e CGPM, est en accord avec les résultats thermodynamiques les meilleurs connus à ce moment. Le texte de cette Échelle est publié dans *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, Annexe T 31, et *Comptes rendus 15^e CGPM*, 1975, Annexe 2; la traduction anglaise est publiée dans *Metrologia*, 12, N° 1, 1976, p. 7.

Les principaux instruments utilisés pour la mesure des températures dans l'Échelle Internationale sont le thermomètre à résistance de platine, le thermocouple platine rhodié

(2) La différence UTC - TAI était - 19 s le 1^{er} janvier 1981.

(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.

En 1978, une échelle pour la mesure des basses températures a été mise en application sous le nom d'« Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K » (EPT-76). Cette échelle provisoire pratique est publiée dans *Comité Consultatif de Thermométrie*, 12^e session, 1978, p. T 7 et *Procès-Verbaux CIPM*, 46, 1978, p. T 7; la traduction anglaise est publiée dans *Metrologia*, 15, 1979, p. 65.

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 ¹²C 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⁽³⁾. La masse correspondant à 1 mole de X est alors $[m(\text{X})/m(^{12}\text{C})] \times 0,012$ kg, ce que l'on exprime en disant que la masse molaire $M(\text{X})$ de X (quotient de la masse par la quantité de matière) est :

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

Par exemple, l'atome de fluor ¹⁹F et l'atome de carbone ¹²C ont des masses qui sont dans le rapport 18,9984/12. La masse molaire du gaz moléculaire F₂ 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 F₂, 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 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 la substance B est donnée par la formule générale :

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

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

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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 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) (*). 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.

(*) Publications CIE N° 18 (1970), p. 43, et N° 15 (1971), p. 93; *Procès-Verbaux CIPM*, 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.

ANNEXE III

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

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 les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1980, quarante-cinq États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, URSS, Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International ; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 8 600 000 francs-or (en 1981), soit environ 3 400 000 dollars US.

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 modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des 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 (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués 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), 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* (CEMRI), 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 les Masses 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).

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

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.

(Décembre 1980)

INDEX

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

- accélération due à la pesanteur (g_n), 22
ampère, **8**, 24
atmosphère normale, **27**
atto, 32
- becquerel, 38
bougie nouvelle, 23, 35
Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 46-48
- candela, **9**, 34, 38
Comité International des Poids et Mesures (CIPM), 46-48
Comités Consultatifs, 47
Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), 46-47
Convention du Mètre, 46
coulomb, **24**
curie, 32
- décimètre cube, 31
degré Celsius, 8, 25, 33
définitions des unités, mise en pratique des, 41-45
- échelle thermodynamique à un seul point fixe (point triple de l'eau), 24, 26
étalon de fréquence (^{133}Cs), 31
exa, 38
- farad, **24**
femto, 32
fréquence, étalon de, 31
- g_n , 22
grandeurs
 électriques, 43
 photométriques, 45
 système de, 6
gray, 38
- henry, **24**
- joule, **24**, 24-25
- kelvin, **8**, 33, 34
kilogramme, 7, 16, 21, 22, 35
- législations sur les unités, 6
litre, 22, 31, 32; symboles, 39
longueur, 41
lumen, **23**
- masse, 42
masse et poids, 22
mètre, 7, 21, 23, 28
micron, 35
mise en pratique des définitions des principales unités, 41-45
mole, **8**, 37
multiples du kilogramme, 16, 35
- newton, **23**
nombres, écriture des, 26
- ohm, **24**
- pascal, 36
peta, 38
poids (*voir* à masse)
préfixes SI, 6, 15, 30, 32, 38
 règles d'emploi, 15
- quantité de matière, 44
- radian, 13
- seconde, 7, 27, 29, 33
siemens, 36
sievert, 39
stéradian, 13
symboles
 écriture et emploi des, 14, 26
 litre, 39
 unités de base, 10
 unités dérivées ayant des noms spéciaux, 11

- système
de grandeurs, 6
international d'unités (SI), 28; 29 (adoption); 35
pratique d'unités de mesure, proposition d'établissement d'un, 25, 27
- TAI, 36
- température, 43
Celsius, 8
thermodynamique, 8, 33
- temps, 42
atomique international, 36
universel coordonné, 37
- unités
CGS ayant des noms spéciaux, 19
électriques, 24
en usage avec le SI, 17
généralement déconseillées, 20
législations sur les, 6
maintenues temporairement, 18
photométriques, 23
de quantité de chaleur (joule), 24
- unités SI
les 3 classes, 5
de base, 7; symboles, 10
dérivées, 10-13, 30, 34
ayant des noms spéciaux, 11
multiples et sous-multiples des, 6, 15
supplémentaires, 13, 30, 40
- UTC, 37
- volt, **24**
- watt, **24**
- weber, **24**
-

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1981, n° 3872
ISBN 92-822-2067-2
ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 9 AVRIL 1981
Imprimé en France

