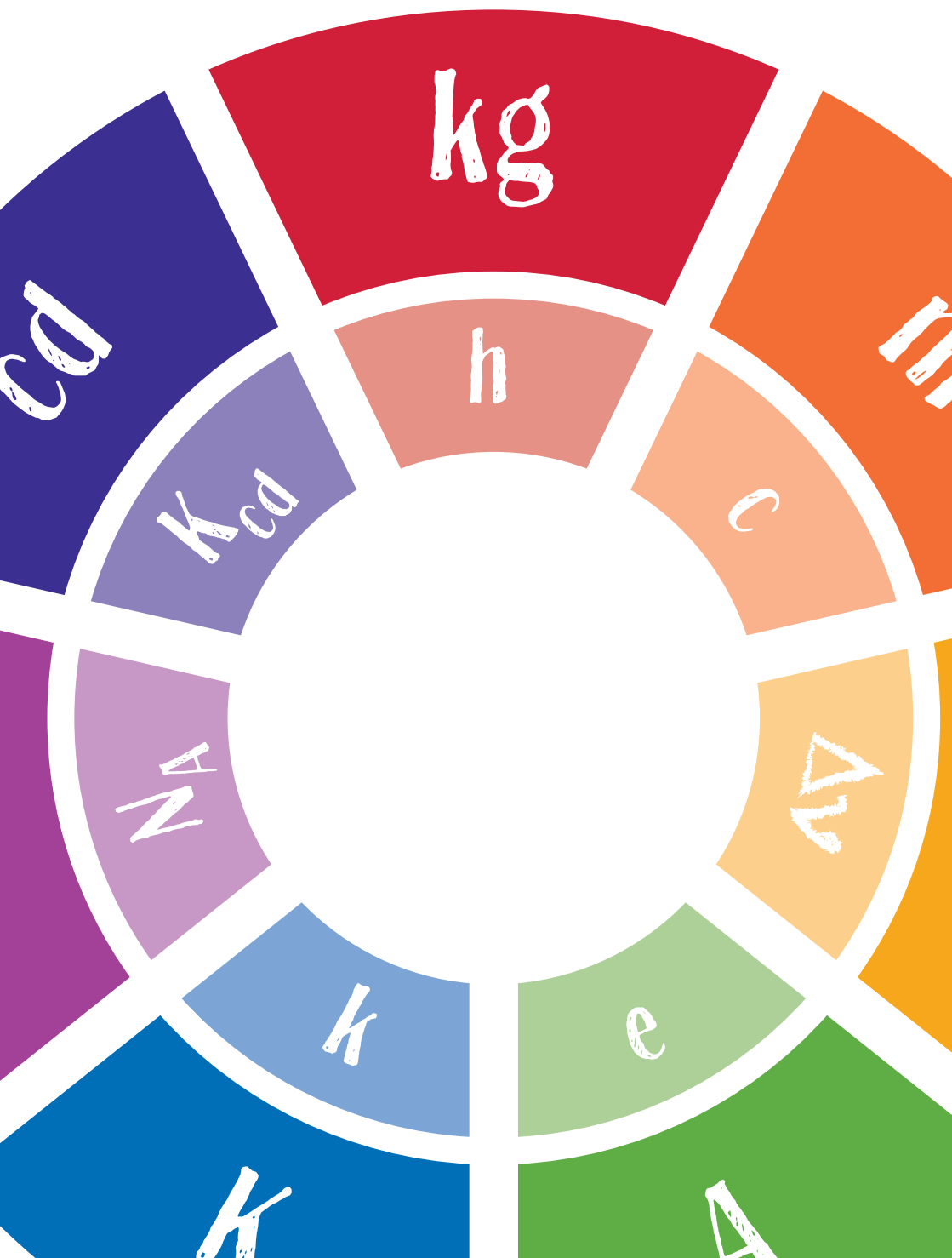


Nos unités de mesure

Le Système international d'unités

SI







La mesure, omniprésente et indispensable	05
--	----

Le Système international d'unités SI

Constantes au centre de tout	06
Kilogramme – kg	08
Mètre – m	10
Seconde – s	12
Ampère – A	14
Kelvin – K	16
Mole – mol	18
Candela – cd	20

Les mesures créent le savoir, la sécurité, la fiabilité et rendent la production possible

Traçabilité indispensable	22
Toujours plus exact ?	24
Institut fédéral de métrologie METAS	26

D'une mesure humaine locale au Système d'unités mondial

De la multitude à l'unité	28
Convention du Mètre	30
De la Convention du Mètre au Système international d'unités (SI)	32
Le Système international d'unités, un système en constante évolution	34

Annexe

Préfixes SI	36
Expression des valeurs numériques des grandeurs physiques	37
Définition des principales unités	38

cd

Écran : 600 candela par m^2

A

Accumulateur :
Courant électrique de
l'ordre du milliampère

s

GPS : détermination
de la position grâce à la
mesure du temps de
l'ordre de la nanoseconde

kg

appareil : 192 g

m

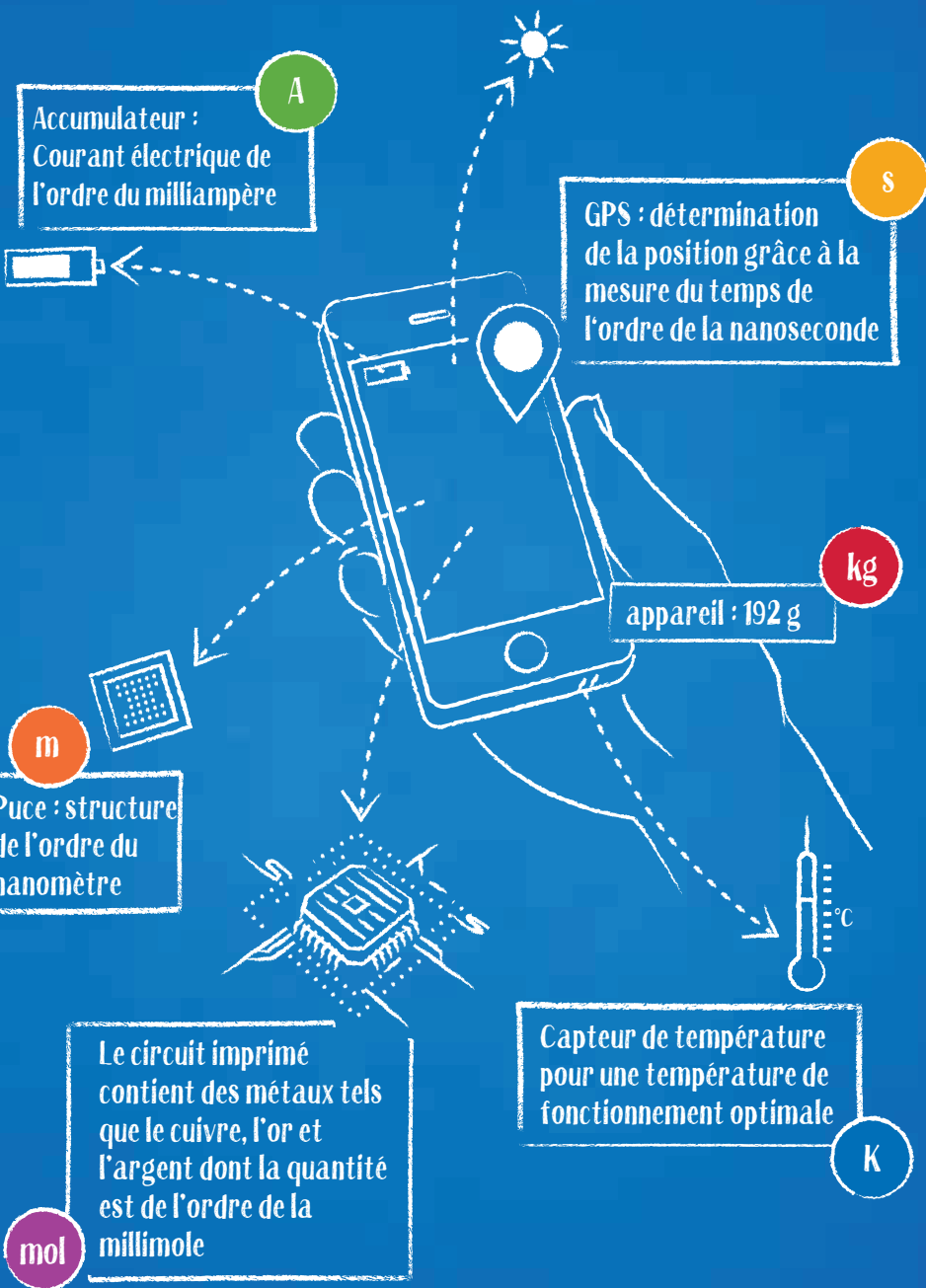
Puce : structure
de l'ordre du
nanomètre

Le circuit imprimé
contient des métaux tels
que le cuivre, l'or et
l'argent dont la quantité
est de l'ordre de la
millimole

mol

K

Capteur de température
pour une température de
fonctionnement optimale



La **mesure,** omniprésente et indispensable

L'homme mesure depuis toujours, car mesurer lui permet de quantifier son monde et de se repérer dans son environnement. Au temps du troc, il fallait déjà déterminer de manière fiable la quantité de marchandises échangées.

Notre monde industrialisé dépend beaucoup des mesures. En effet, nous nous fions en permanence à des mesures dans notre quotidien axé sur la haute technologie, dès le moment où notre réveil sonne et que nous allumons la lumière jusqu'à ce que nous allions nous coucher. Sans mesures exactes, un produit technique aussi complexe qu'un téléphone mobile ne pourrait être développé ni fabriqué. Nous ne pourrions d'ailleurs même pas téléphoner ni recevoir ou échanger des données.

Le Système international d'unités (SI) est aujourd'hui la base contraignante en ce qui concerne les mesures sur le plan mondial. Une révision fondamentale de ce système a été décidée au mois de novembre 2018. Certaines unités, comme par exemple le kilogramme, ont été redéfinies. Le SI peut ainsi s'adapter aux progrès technologiques. La présente brochure fournit de plus amples informations sur l'importance des mesures, les unités de mesure et le SI.

Le Système international d'unités

SI

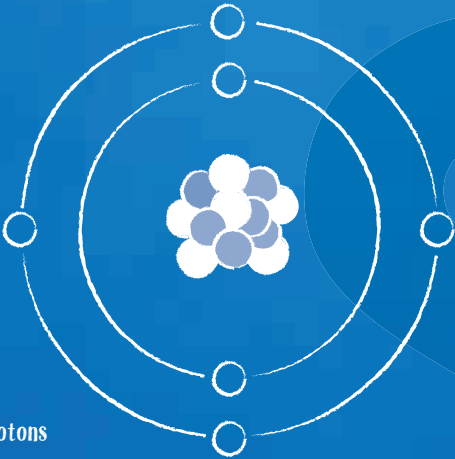
Toutes les unités sont définies au moyen de constantes physiques depuis la révision fondamentale du Système international d'unités (SI), entrée en vigueur en mai 2019. Comme le SI se fondait auparavant sur sept unités de base, sept constantes sont nécessaires à la définition du SI. Une unité définie par la valeur fixe de constantes naturelles peut être réalisée selon les lois de la physique en vertu de l'état actuel de la science et de la technique. Il est donc possible d'améliorer la réalisation d'une unité sans que cette unité doive être redéfinie. Par conséquent, le SI est ouvert aux technologies et aux développements.

Le SI est défini au moyen des sept constantes suivantes :

Constante à définir	Symbole	Valeur	Unité	Symbole
Constante de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$)	Kilogramme	kg
Vitesse de la lumière dans le vide	c	$299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$	Mètre	m
Fréquence de transition de la structure hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133	$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	$9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$	Seconde	s
Charge élémentaire	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ($\text{C} = \text{A s}$)	Ampère	A
Constante de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ($\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$)	Kelvin	K
Constante d'Avogadro	N_{A}	$6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	Mole	mol
Équivalent de rayonnement photométrique d'un rayonnement monochromatique de $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$	K_{cd}	683 lm W^{-1}	Candela	cd

Les éléments de la nature, les particules élémentaires comme les électrons, les protons ou les neutrons possèdent partout les mêmes propriétés : la charge d'un électron est toujours la même. La vitesse de la lumière est indépendante du lieu et du temps. La constante de Planck est une autre constante fondamentale, qui détermine le rapport entre l'énergie et la fréquence des particules du rayonnement électromagnétique. Elle aussi reste inchangée dans tout l'univers.

Lorsque l'on veut définir un système d'unités stable avec des définitions d'unités applicables de préférence à long terme, il convient de prendre ces éléments de la nature comme points de référence pour le système d'unités. Cette procédure n'a pas été facile à réaliser pour toutes les anciennes unités de base du Système international d'unités (SI). Il a fallu des années de travaux de développement et d'expériences complexes jusqu'à ce qu'il soit possible de fonder l'entier du SI sur un ensemble de constantes avec des valeurs définies de manière exacte.



- Protons
- Neutrons
- Électrons

$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C (C = A s)}$$

Kilogramme

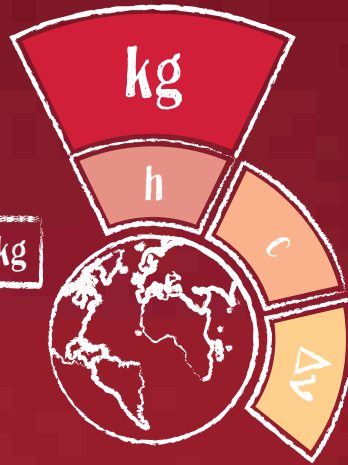
kg

Le kilogramme (kg) est l'unité de mesure de la masse. Cette unité présente surtout de l'intérêt dans le commerce.

Jusqu'à récemment, l'unité kilogramme était définie par le prototype international du kilogramme étalon à Paris. Elle était la dernière unité encore définie par une mesure matérialisée, un artéfact. Le kilogramme étalon, un cylindre de métal en alliage de platine et d'iridium n'était conservé qu'à un seul endroit : dans un coffre-fort du Bureau international des poids et mesures à Paris. Un artéfact comme le kilogramme étalon ne demeure pas inchangé durant une longue période. Il peut perdre des atomes. Son nettoyage peut induire, au cours du temps, une perte de quelques millièmes de grammes. Il peut également absorber des molécules présentes dans l'air et devenir ainsi un peu plus lourd. En outre, un artéfact pourrait être endommagé ou disparaître.

Une définition qui se base sur des constantes naturelles permet d'éviter de tels effets. L'unité kilogramme est désormais définie par des constantes, à savoir la constante de Planck h et d'autres constantes.

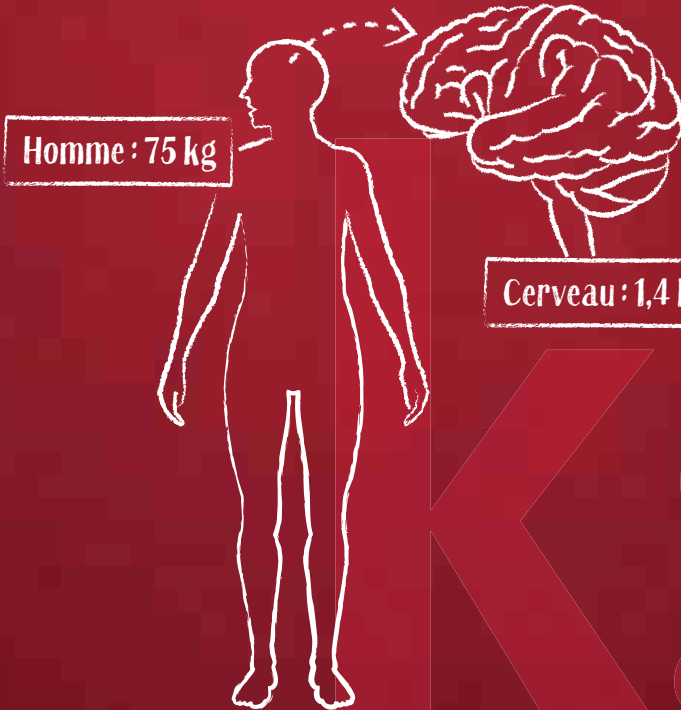
La constante de Planck a d'abord dû être déterminée avec l'incertitude de mesure requise (l'incertitude de mesure est une mesure pour l'exactitude) avant de pouvoir remplacer la définition de l'unité kilogramme. La constante de Planck a été déterminée par deux expériences différentes : l'expérience de la balance du Watt et le projet Avogadro. La balance du Watt est une expérience complexe qui se déroule en deux phases et repose sur la comparaison exacte de la puissance mécanique et électrique. METAS a développé une balance de ce type. Le projet Avogadro consistait à compter des atomes de silicium dans une sphère fabriquée avec une exactitude extrême en un silicium de grande pureté, avec une masse bien définie. Cette expérience a également permis de déterminer la constante de Planck. Désormais, la valeur de la constante de Planck est fixée. L'unité kilogramme ayant été définie par une valeur fixe de la constante de Planck, cette unité peut être réalisée au moyen d'une balance du Watt ou d'une autre expérience. Par sa définition sur la base de constantes naturelles la stabilité à long terme de l'unité kilogramme est garantie.



Terre : $5,972 \times 10^{24}$ kg



Baleine bleue : 190'000 kg



Homme : 75 kg

Cerveau : 1,4 kg

kg

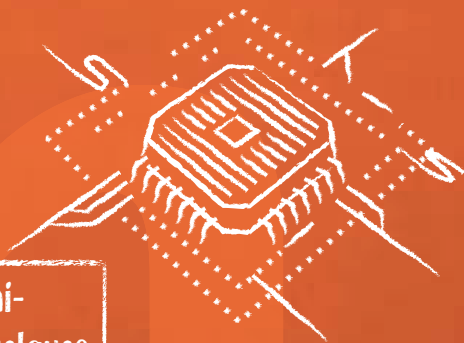


Taille d'un
homme : 1,75 m

Circonférence de la Terre :
 $4,0075 \times 10^7$ m

Coudée : 0,28 m

Structure des semi-
conducteurs de quelques
nanomètres : 10^{-9} m



Mètre



Le mètre (m) est l'unité de mesure de la longueur. Il a donné son nom au système métrique.

À l'origine, l'unité mètre a aussi été définie par une mesure matérialisée, un artéfact : le mètre étalon, une barre métallique en alliage de platine et d'iridium avec une coupe transversale en forme de x. L'unité mètre est définie par une constante naturelle depuis 1983. Il s'agit de la vitesse de la lumière. Un mètre correspond à la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ secondes, à savoir environ 3,3 nanosecondes (3,3 milliardièmes de secondes). Ce petit chiffre est dû à la grande vitesse de la lumière, qui parcourt par exemple l'équateur environ 7,5 fois par seconde. Le fait que la lumière parcourt la distance d'un mètre en 3,3 nanosecondes nous permet également de constater que les systèmes de navigation comme les GPS dépendent d'une mesure du temps d'une exactitude extrême. Les récepteurs GPS de haute précision, par exemple utilisés pour l'arpentage, peuvent mesurer avec exactitude des distances de 1,5 cm. Afin d'obtenir cette exactitude on doit pouvoir mesurer le temps sur environ 0,03 nanosecondes (milliardièmes de secondes).

Grâce à la définition de l'unité mètre se basant sur la lumière, on mesure les longueurs de manière très exacte. Le mètre peut être dérivé de la longueur d'onde de la lumière laser au moyen de lasers, dont la fréquence est connue et extrêmement stable. La lumière forme en quelque sorte une échelle immatérielle avec une exactitude sans précédent : on réalise aujourd'hui l'unité mètre à onze chiffres après la virgule.

L'exactitude dans le domaine des nanomètres est utilisée dans les installations modernes, par exemple dans l'industrie des semi-conducteurs, où des structures sont fabriquées avec des tolérances de quelques nanomètres. Cette exactitude permet la fabrication d'ordinateurs très puissants et d'appareils électroniques miniatures.

Seconde

S

La seconde (s) est l'unité de mesure du temps. Le temps est le mesurande qu'on peut définir avec l'exactitude la plus élevée.

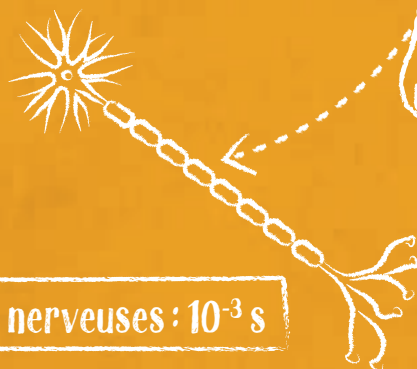
On mesure le temps depuis déjà des millénaires. À cet effet, on s'est longtemps basé sur le mouvement de la Terre par rapport au soleil, en particulier sur l'observation de la rotation de la Terre autour de son axe. À l'origine, la seconde a été déterminée en tant que $\frac{1}{86\,400}$ partie du jour solaire moyen (un jour correspond à 24 heures, chaque heure comportant 60 minutes et chaque minute, 60 secondes). La vitesse de rotation de la Terre n'est toutefois pas constante. On a remarqué ce phénomène dès le premier tiers du 20^e siècle au moyen de mesures du temps hautement exactes. On a donc cherché une nouvelle définition pour la seconde, que l'on a trouvée dans le monde microscopique. En effet, depuis 1967, la seconde est définie par les propriétés d'un atome, notamment au moyen d'une transition dans un atome de césium (transition de la structure hyperfine de l'atome de césium $\Delta\nu_{\text{CS}}$). Les oscillations de l'atome de césium sont si régulières que nous pouvons définir le temps avec

une extrême exactitude au moyen d'horloges atomiques.

Le temps est le mesurande qu'on peut définir avec l'exactitude la plus élevée. Les horloges atomiques modernes peuvent réaliser la seconde avec seize chiffres après la virgule. Une telle exactitude n'est pas une fin en soi : les systèmes de navigation et de télécommunication fonctionnent de manière fiable grâce à une mesure du temps d'extrême exactitude (voir section Mètre).

La Fontaine Continue Suisse (FoCS), une des horloges atomiques les plus exactes du monde, se trouve à METAS. L'Institut l'a développée en collaboration avec le laboratoire Temps-Fréquence de l'Université de Neuchâtel. Depuis fin 2018, la Suisse contribue directement à l'exactitude du Temps universel coordonné, au moyen de cette horloge atomique.

Battement de cils : 0,1 s



Impulsions nerveuses : 10^{-3} s



Journée : 86400 s

Âge de la Terre : $1,5 \times 10^{17}$ s



Ampère



L'ampère (A) est l'unité de mesure de l'intensité de courant. Le courant électrique représente un flux de charge électrique.

L'unité ampère est définie au moyen de constantes : notamment la charge élémentaire e et d'autres constantes. La charge élémentaire est la plus petite quantité de charge électrique existant librement. Un électron a une charge électrique de $-e$. Un ampère correspond à un flux d'environ 6×10^{18} charges élémentaires par seconde.

Sur la base de cette définition, il sera possible de réaliser l'ampère au moyen d'une pompe à électron unique. Ce dispositif produit un courant électrique par le transport contrôlé de chaque électron pendant une période de temps déterminée. Les intensités de courant ainsi produites sont toutefois encore très petites.

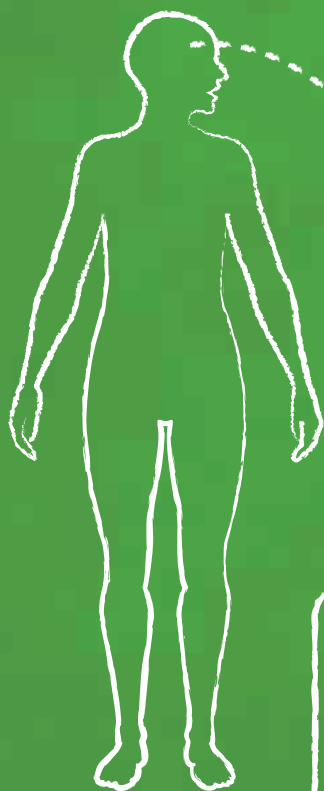
En général, les unités électriques ne sont pas réalisées au moyen de l'ampère, mais au moyen des unités électriques volt (unité de tension électrique) et ohm (unité de résistance électrique). La loi d'Ohm relie directement les gran-

deurs électriques tension et résistance. Depuis les années 1990, les unités de résistance et de tension peuvent être réalisées de manière extrêmement exacte au moyen d'effets de la physique quantique.

Les mesures exactes du courant électrique sont essentielles au développement d'appareils (smartphones, ordinateurs portables) ou de batteries durables, non polluantes. Des mesures exactes d'autres mesurandes pour l'électricité, en particulier la puissance et la tension électriques sont essentielles pour l'approvisionnement en énergie (garantie du fonctionnement des réseaux électriques, prévention des perturbations dans les réseaux électriques).

L'intensité de courant dans les impulsions nerveuses du corps est de dix milliardièmes d'ampères, tandis que le courant d'un éclair peut atteindre 20 000 ampères.

Éclair : $20\,000\text{ A}$



Activité cérébrale : 10^{-9} A



Prise :
 $4,3\text{ A}$

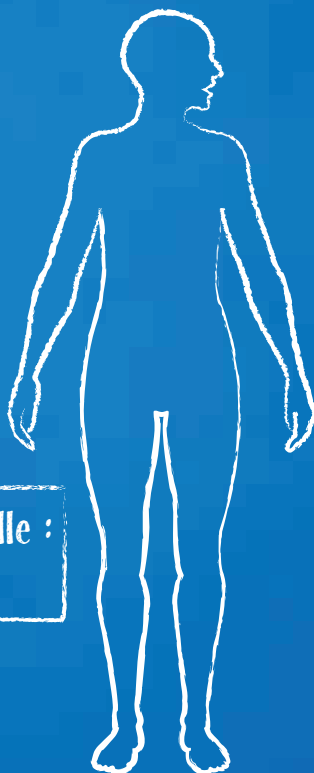
Température
dans l'espace :
 $3,15\text{ K } (-270\text{ }^{\circ}\text{C})$



Température de l'air :
 $288\text{ K } (15\text{ }^{\circ}\text{C})$



Température corporelle :
 $310\text{ K } (36,5\text{ }^{\circ}\text{C})$



Kelvin

K

Le kelvin (K) est l'unité de mesure de la température. La température est la seul mesurande qui indique une propriété d'une matière.

L'unité de la température a été définie au moyen des propriétés de l'eau, plus exactement par le point triple de l'eau. Le point triple est l'état où les trois phases physiques d'une matière. Le point triple est l'état où les trois phases physiques d'une matière (en ce qui concerne l'eau, il s'agit des états solide, liquide et gazeux) existent en même temps à une pression déterminée et à une température déterminée et sont en équilibre thermodynamique. La température de ce point s'élève à $+0,01^{\circ}\text{C}$ (degrés Celsius) ou 273,16 K. Un kelvin est la 273,16^e partie de cette température. Zéro kelvin correspond au zéro absolu. Ainsi, il n'y a aucune température négative dans l'échelle de température kelvin. Il s'agit d'une échelle de température absolue, contrairement, par exemple, à l'échelle Celsius, utilisée au quotidien. On se réfère à des points fixes d'autres matières (points triples, de fusion

et d'ébullition) pour pouvoir réaliser l'échelle de température kelvin. Sa réalisation à partir du zéro absolu et du point triple de l'eau est très complexe et sensible aux impuretés. En outre, il est difficile de réaliser des températures très basses et très élevées.

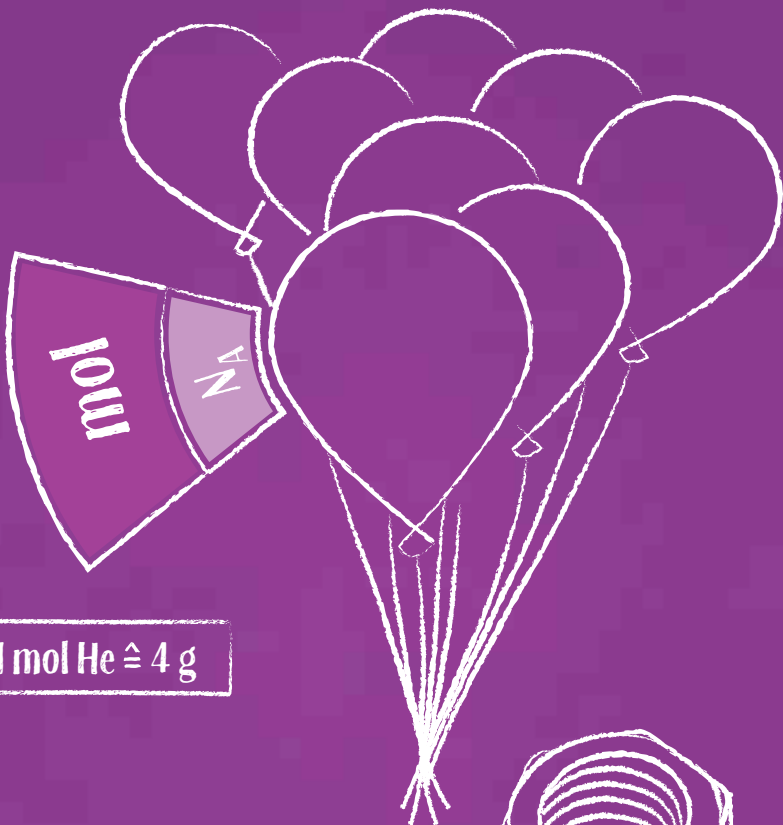
Depuis peu, le kelvin est défini au moyen de la constante de Boltzmann k et d'autres constantes. La constante de Boltzmann permet de corréler l'énergie thermique et la température d'une particule. À l'avenir, grâce à cette définition se basant sur les constantes, le kelvin ne dépendra plus d'une matière, mais sera défini sans restrictions matérielles ni technologiques. Ainsi, on pourra, par exemple, mesurer des températures élevées avec une exactitude nettement plus élevée qu'auparavant.

Mole mol

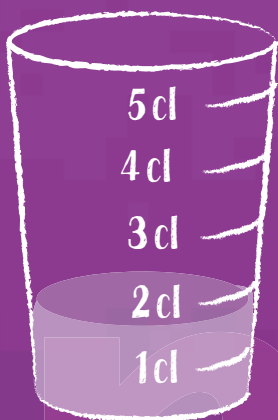
La mole (mol) est l'unité de mesure de la quantité de matière. Elle est définie par la constante d'Avogadro, qui indique le nombre de particules par quantité de matière.

La quantité de matière d'un système est une mesure du nombre d'entités élémentaires déterminées. Il peut s'agir d'atomes, de molécules, d'ions, d'électrons ou d'autres particules. Une mole contient exactement $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. À l'origine, la mole était définie comme la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 grammes de carbone. Cette définition liait la mole au kilogramme. À présent, l'unité mole est indépendante de l'unité kilogramme.

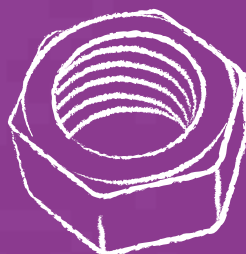
Il n'y a, au demeurant, pas eu besoin d'unité visant à indiquer la quantité de matière. Il suffit de compter les différents composants. Toutefois, les atomes ou les molécules sont si infimes et ils se présentent en général en si grand nombre qu'un simple comptage n'est pas possible dans la pratique. Si l'on connaît les rapports entre masses atomiques et masses moléculaires, on peut également mesurer les quantités de matière par des pesées, lorsque l'on utilise la mole comme mesure de référence pour ces pesées. La mole est un outil pour chimistes et biologistes, qui fait en quelque sorte le lien entre le monde microscopique des atomes et le quotidien du laboratoire.



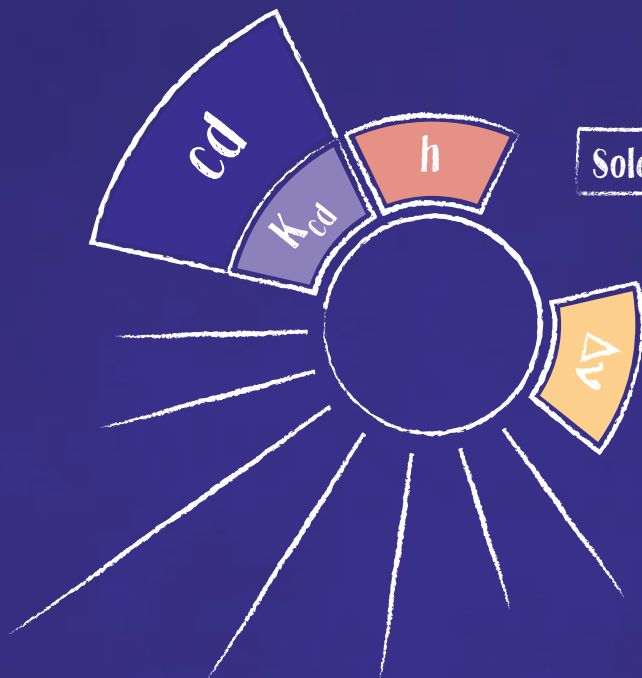
$1 \text{ mol He} \hat{=} 4 \text{ g}$



$1 \text{ mol Fe} \hat{=} 56 \text{ g}$

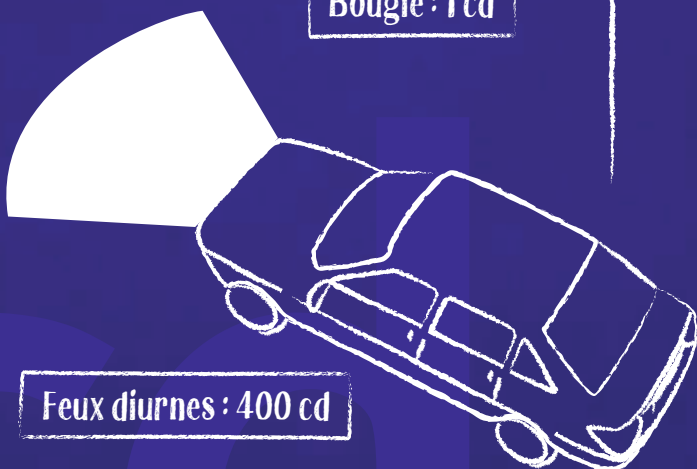


$1 \text{ mol H}_2\text{O} \hat{=} 18 \text{ g}$



Soleil : 3×10^{27} cd

Bougie : 1 cd



Feux diurnes : 400 cd

Candela

cd

La candela (cd) est l'unité de mesure de l'intensité lumineuse dans une direction déterminée.

La lumière est la partie du rayonnement électromagnétique, qui est visible pour l'œil humain. On pourrait donc mesurer la lumière avec des unités de mesure déjà connues, notamment en watt, l'unité de mesure de la puissance. En raison de l'importance fondamentale du sens humain de la vue, on a toutefois convenu de fixer une unité distincte pour l'effet subjectif du rayonnement électromagnétique sur l'œil humain.

L'unité est définie par la constante K_{cd} , l'équivalence de rayonnement photométrique d'un rayonnement monochromatique 540×10^{12} Hz. La constante relie les unités de mesure de la lumière visible (lumen, candela, lux) aux unités de mesure du rayonnement électromagnétique correspondantes (watt, watt par stéradian, watt par mètre carré). Une intensité lumineuse de 1 cd correspond à une intensité de rayonnement de $1/638$ watt par stéradian. Cette relation s'applique uniquement au rayonnement d'une source lumineuse d'une fréquence de

540×10^{12} Hz, à savoir une lumière verte monochromatique de longueur d'onde d'environ 555 nm. Le rattachement à une lumière verte est en rapport avec la capacité cognitive de l'œil humain. Nous voyons mieux dans le spectre vert. La lumière blanche est principalement utilisée dans la technique d'éclairage. C'est pourquoi l'application pratique de la technique d'éclairage est importante afin d'avoir des instructions (une mise-en-pratique) relatives à l'utilisation de l'unité candela. Ces instructions décrivent la manière de définir quantitativement la lumière polychromatique (par ex. la lumière blanche d'une lampe à LED).

Du latin candela (chandelle), le nom de l'unité se rapporte aux débuts de la technique d'éclairage: afin de pouvoir déterminer l'intensité lumineuse, on se basait sur des bougies comme sources lumineuses de référence, avec lesquelles on pouvait comparer une source de lumière à mesurer.

Les mesures

créent le savoir,
la sécurité, la fiabilité
et rendent
la production
possible

Traçabilité indispensable

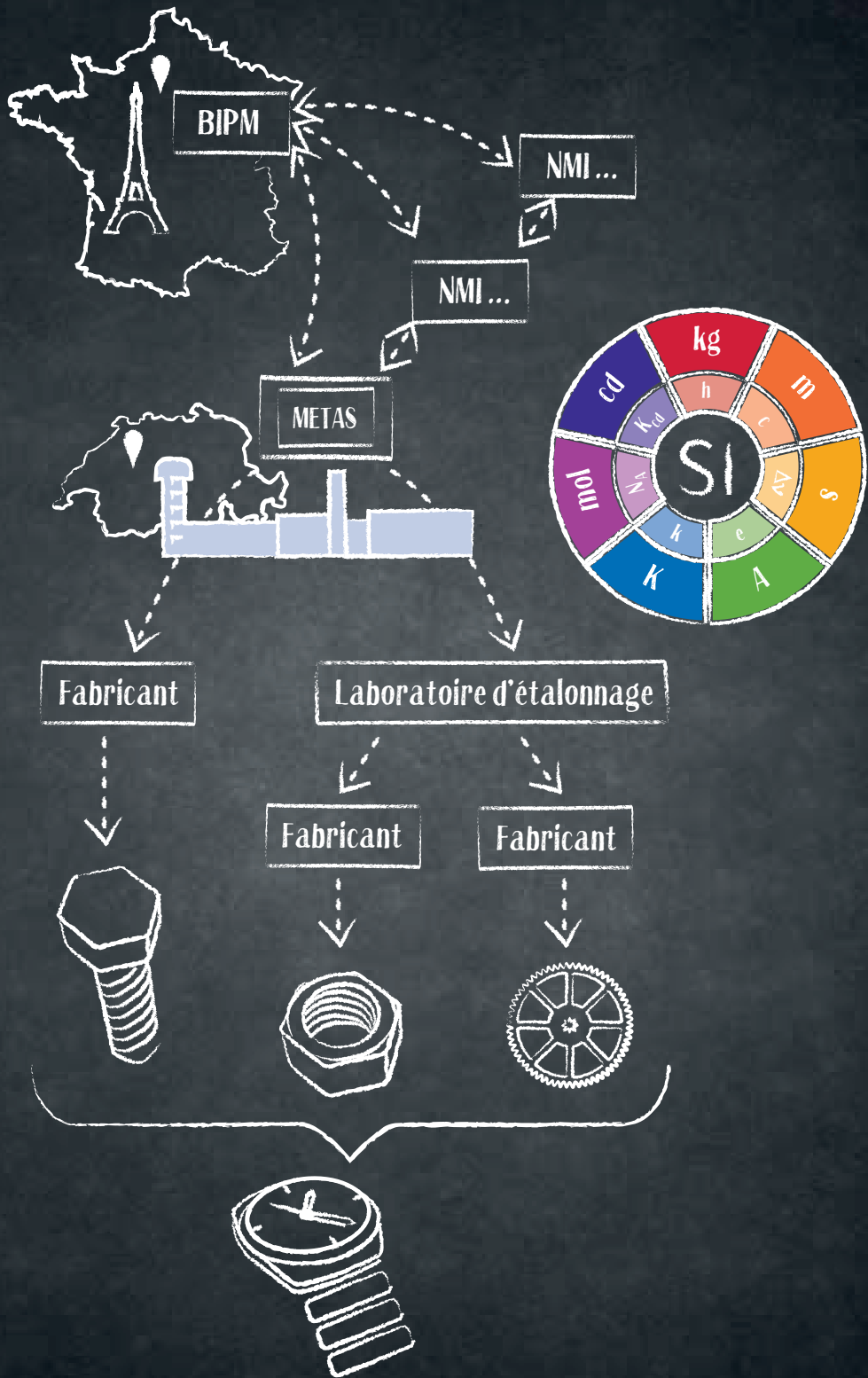
La tâche la plus importante de la métrologie consiste à assurer que les mesures soient effectuées de manière fiable et correcte. Une des conditions requises pour une bonne comparabilité des mesures consiste à ce que tous mesurent avec les mêmes unités de mesure. Aujourd'hui, le Système international d'unités (SI) est la base contraignante internationale pour les mesures.

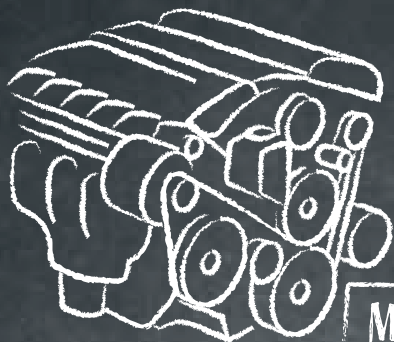
La traçabilité métrologique des résultats de mesure est une autre condition pour des mesures fiables. La terme traçabilité signifie la propriété d'un résultat de mesure selon laquelle ce résultat peut être relié à une référence par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue et documentée d'étalonnage dont chacun contribue à l'incertitude de mesure (une information sur l'exactitude d'une mesure). La référence peut être une réalisation pratique d'une unité de mesure, un étalon ou une procédure de mesure. Pour la traçabilité, les mesures de référence reconnues doivent être disponibles avec l'exactitude requise. C'est une des tâches principales des instituts nationaux de métrologie (NMI), dont METAS en Suisse, qui compare régulière-

ment ses étalons avec ceux des autres instituts nationaux de métrologie afin de pouvoir assurer à tout moment la traçabilité de ces étalons.

Ces comparaisons de mesures sont effectuées dans le cadre de l'organisation internationale de la Convention du Mètre (voir la section La Convention du Mètre). Les organisations régionales de métrologie, qui couvrent les diverses régions du monde, jouent un rôle essentiel pour les activités scientifiques et les activités de coordination au sein de la collaboration internationale en matière de métrologie. EURAMET, l'Association européenne des instituts nationaux de métrologie, est l'une de ces organisations. La majeure partie de la collaboration technique internationale de METAS se déroule au sein des comités techniques d'EURAMET.

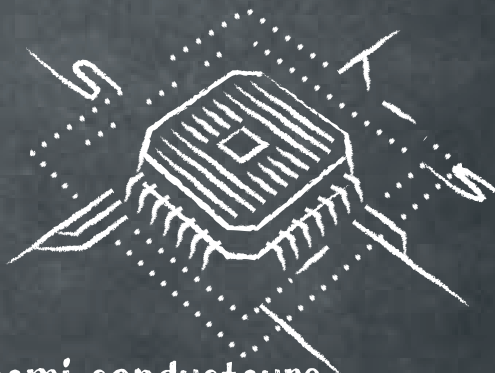
La traçabilité est primordiale pour la fiabilité des mesures, ce qui s'applique aux mesures d'exactitude en laboratoire, à la production industrielle jusqu'au pesage sur le marché hebdomadaire.





Moteur

Micromètre : 10^{-6} m



Structure des semi-conducteurs

Nanomètre : 10^{-9} m

Toujours plus exact ?

Aucune mesure ne peut être plus exacte que l'étalon utilisé. Si l'on veut mesurer un mesurande avec une exactitude déterminée, l'unité de mesure utilisée, doit pouvoir être réalisée de manière plus exacte. Les développements technologiques et scientifiques, et les exigences de l'industrie et de la société en matière d'exactitude de mesure impliquent que les unités de référence, les étalons, doivent être définis de manière toujours plus exacte. Le Système international d'unités (SI), la base contraignante pour les mesures au niveau mondial, doit permettre ces développements ou il doit être adapté en conséquence. Grâce à la révision du SI, entrée en vigueur en mai 2019, notre système d'unités est prêt pour des développements futurs. De plus, il repose sur des bases solides à long terme. Il est conçu de façon à permettre de meilleures réalisations des unités au fil du temps, sans qu'il faille adapter les définitions des unités.

Au quotidien, nous ne nous occupons pas de quelques millièmes de secondes et ne mesurons pas les longueurs au milliardième de mètre près : le millimètre, le dixième de seconde, et le gramme sont suffisants pour

l'usage domestique. Des mesures d'extrême exactitude et l'ambition d'atteindre une exactitude toujours plus élevée ne sont toutefois pas de l'art pour l'art, ou ne présentent de l'intérêt et de l'importance pas uniquement pour les ingénieur/es e ou physicien/nes. La plupart des personnes n'ont aucun rapport direct avec les mesures exactes dans leur quotidien. Toutefois, ceux qui ont peu de contact avec le monde de la technique et des sciences sont toujours indirectement tributaires de mesures exactes et les utilisent aussi régulièrement. Le développement et l'utilisation d'appareils comme les téléphones mobiles et surtout, d'applications comme les systèmes de navigation (voir sections Mètre et Seconde), seraient simplement impossibles sans des mesures de haute exactitude. En 1994, Heinrich Rohrer lauréat du prix Nobel, a résumé la signification de l'exactitude non pas seulement pour le mesurage, mais aussi pour le quotidien : « Il y a 150 ans, la signification du micromètre était évidente pour l'horloger, mais ne l'était pas pour l'agriculteur. Et pourtant, l'exactitude micrométrique a révolutionné le labour : elle a permis la construction du tracteur. »

***« Des mesures d'extrême
exactitude et l'ambition
d'atteindre une exactitude
toujours plus élevée ne sont pas
une fin en soi »***

L'Institut fédéral de métrologie **METAS**

L'Institut fédéral de métrologie (METAS) est, avec ses quelque 230 collaborateurs, le centre de compétences de la Confédération qui répond à toute question relative aux mesures ainsi qu'aux instruments et procédures de mesure. Il est chargé de veiller à ce que l'on puisse mesurer en Suisse avec l'exactitude requise pour le secteur économique, la recherche et la société.

METAS est à la pointe de l'exactitude des mesures en Suisse. Il réalise la base de mesure nationale, c'est-à-dire qu'il s'occupe de la réalisation physique des unités de mesure, de leur comparaison réciproque et, ainsi, de leur reconnaissance internationale. Il met à la disposition du secteur économique, de l'administration et de la société des mesures de référence reconnues selon l'état actuel de la technique et avec l'exactitude requise. METAS fait en sorte que les mesures nécessaires au secteur économique, au commerce, aux transports, ainsi qu'à la protection et à la sécurité de l'homme et de l'environnement puissent être correctement et effectuées, conformément aux prescriptions. Ainsi un kilogramme reste un kilogramme et producteurs et consommateurs peuvent se fier aux affichages des compteurs.

METAS exploite les laboratoires nécessaires à l'accomplissement de son mandat et effectue les travaux de recherche et de développement requis à cet effet. De nouveaux développements scientifiques et techniques sont en permanence largement tributaires des bases et procédures métrologiques qui se développent. Ainsi, d'importants secteurs de l'industrie suisse, comme la microtechnique ou la technique médicale requièrent des procédures de mesure et de réglementation dont l'exactitude se situe à

*« METAS est à la pointe de
l'exactitude des mesures
en Suisse. »*



l'échelle nanométrique (millionième de millimètre). On ne peut fabriquer et contrôler que ce que l'on peut mesurer avec exactitude.

METAS exécute son mandat partiellement avec des tiers, à savoir avec les cantons, leurs vérificateurs et leurs laboratoires de vérification en métrologie légale et avec ses instituts désignés en matière de diffusion des unités.

D'une mesure humaine locale au Système d'unités mondial

De la multitude à l'unité

Les mesures créent ordre et orientation. Elles nous aident à nous repérer dans notre environnement, à nous organiser et à fabriquer des choses au quotidien. Les mesures sont indispensables à la construction d'une maison. Des témoignages de l'époque des pharaons qui nous ont été transmis prouvent qu'on n'aurait pas pu construire les pyramides sans des plans de construction ni des mesures exactes.

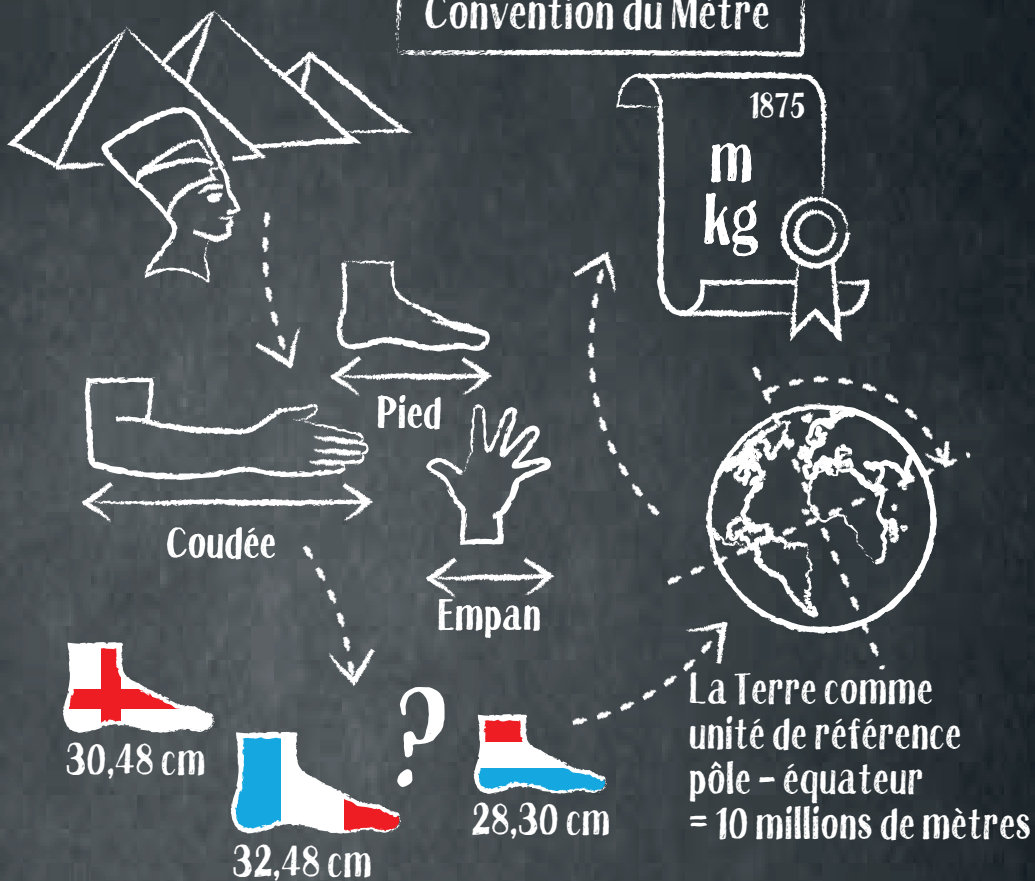
Mesurer signifie comparer. Quelque chose de connu (une mesure de référence) est comparé à quelque chose d'inconnu (l'objet à mesurer). Nos ancêtres utilisaient, entre autres, des unités de mesure comparables, qu'on déduisait à partir de récipients (fût, sac, panier, amphore). Les hommes se sont surtout pris eux-mêmes comme mesures et ont eu recours au corps humain comme étalon de comparaison. De nombreuses unités de mesure ont été dérivées du corps, comme la coudée ou le pied. Le mesurage a d'abord été une affaire locale. Ce constat s'applique également à la détermination des unités de mesure. Les unités de référence dérivées du corps humain ont été pour la plupart empruntées au souverain d'un royaume ou d'une région.

Ainsi, avec le temps, une multitude d'unités de mesure ont coexisté. Elles variaient de principauté en principauté et souvent même de ville en ville. Malgré une dénomination identique, une unité de mesure pouvait, selon la région, désigner une grandeur variable du mesurande en question. Le pied, l'unité de longueur, était par exemple répandu dans de nombreux endroits, mais, pendant longtemps, il n'y a pas eu partout la même longueur. Au XIX^e siècle, sur le territoire de l'Allemagne actuelle, il existait encore des centaines de mesures du pied spécifiques à un pays ou à une région. Sur le seul territoire de la France, durant la période avant la Révolution française, on a dû mesurer avec des milliers d'unités et de poids différents.

Au début du XIX^e, en Argovie, il y avait cinq unités de longueur différentes. Concernant le poids, la livre bernoise (520,035 g), la livre sédunoise (500 g) et la livre fribourgeoise (528,811 g) ont notamment prêté à confusion, car elles représentaient respectivement un poids différent tout en ayant la même unité. On a certes fait la distinction entre une livre légère et une livre lourde, mais la limite était mince.

Cette diversité de valeurs de référence pouvait prêter à confusion et occasionner des frais, voire des conflits. Le commerce suprarégional n'était que très difficile. Une telle diversité était également un problème pour la technique et la recherche, car les résultats de mesure peuvent uniquement être comparés s'ils se réfèrent à la même unité et si cette unité est également définie de manière uniforme.

Convention du Mètre



Déjà au XVI^e siècle, mais avant tout dans le contexte de la diffusion des sciences naturelles au XVIII^e siècle, on a eu l'idée de désigner la Terre au lieu du corps humain comme unité de référence. Ainsi la nouvelle unité de longueur, le mètre, a été associée à la circonférence de la Terre: un mètre a été défini comme la dix-millionième partie du quart de cercle entre le pôle Nord et l'équateur. Durant la Révolution française, deux astronomes ont mesuré, sous les

circonstances les plus défavorables, une partie de cette circonférence: la distance entre Barcelone et Dunkerque, afin de pouvoir créer une unité de référence matérialisée.

Il a toutefois fallu quelque cent ans avant que la base d'un système d'unités contraignant soit créée, grâce à la Convention du Mètre, signée en 1875, où, outre le mètre étalon, le kilogramme étalon est également défini.

« Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) en tant que gardien des unités de mesure. »

Convention du Mètre

Au XIX^e siècle, l'industrialisation croissante et l'expansion du commerce international en résultant ont nécessité davantage de bases de mesure comparables et uniformes. L'harmonisation et l'uniformisation des systèmes de mesure ont donc été placées au centre des préoccupations de la politique économique.

La Convention du Mètre a été signée le 20 mai 1875 à Paris par les représentants de dix-sept États, dont la Suisse. L'objectif de ce traité était de créer un système d'unités de mesure contraignant et uniforme au niveau international, et de le faire évoluer en fonction des progrès scientifiques et techniques.

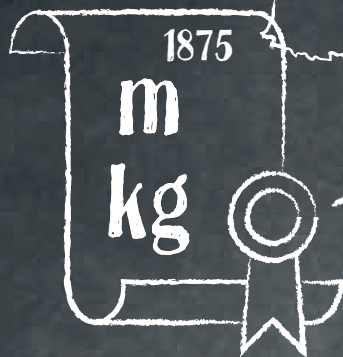
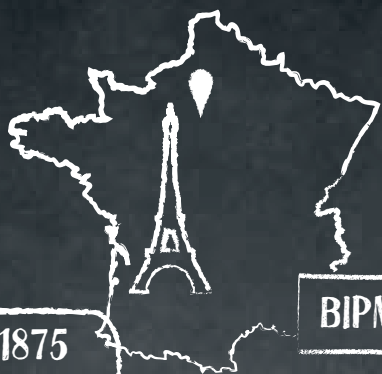
La Convention du Mètre est l'un des premiers traités internationaux. Elle compte actuellement 59 États membres et 42 États et entités économiques associés.

En 1889, des artefacts matériels ont été fabriqués pour la définition de l'unité mètre et de l'unité kilogramme. Les premiers d'entre eux

ont servi de prototypes internationaux du kilogramme et du mètre (kilogramme étalon et mètre étalon). Des copies de ces prototypes ont ensuite été distribuées aux États membres par tirage au sort. La Suisse a reçu le mètre n° 2 et le kilogramme n° 38.

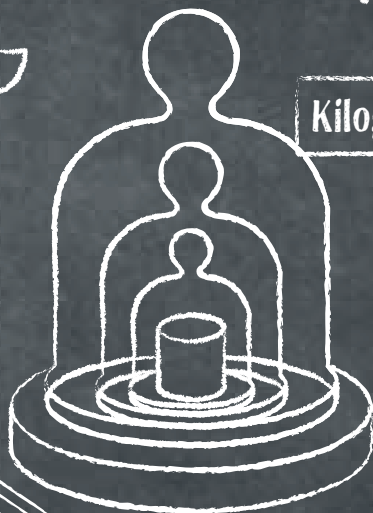
La Convention du Mètre a créé le Bureau international des poids et mesures (BIPM) en tant que gardien des unités de mesure.

Le BIPM, dont le siège est à Sèvres, près de Paris, travaille sous la surveillance du Comité international des poids et mesures (CIPM). Différents comités techniques du CIPM, par ex. le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées, s'occupent de l'évolution des unités de mesure. La Conférence générale des poids et mesures, composée des délégués de tous les États membres, est l'organe suprême de la Convention du Mètre. Elle se réunit en général tous les quatre ans et prend notamment des décisions concernant les révisions du Système international d'unités.

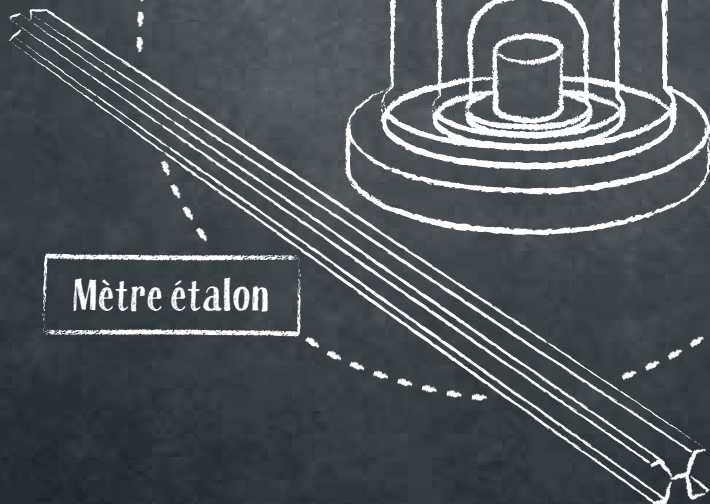


Convention du Mètre

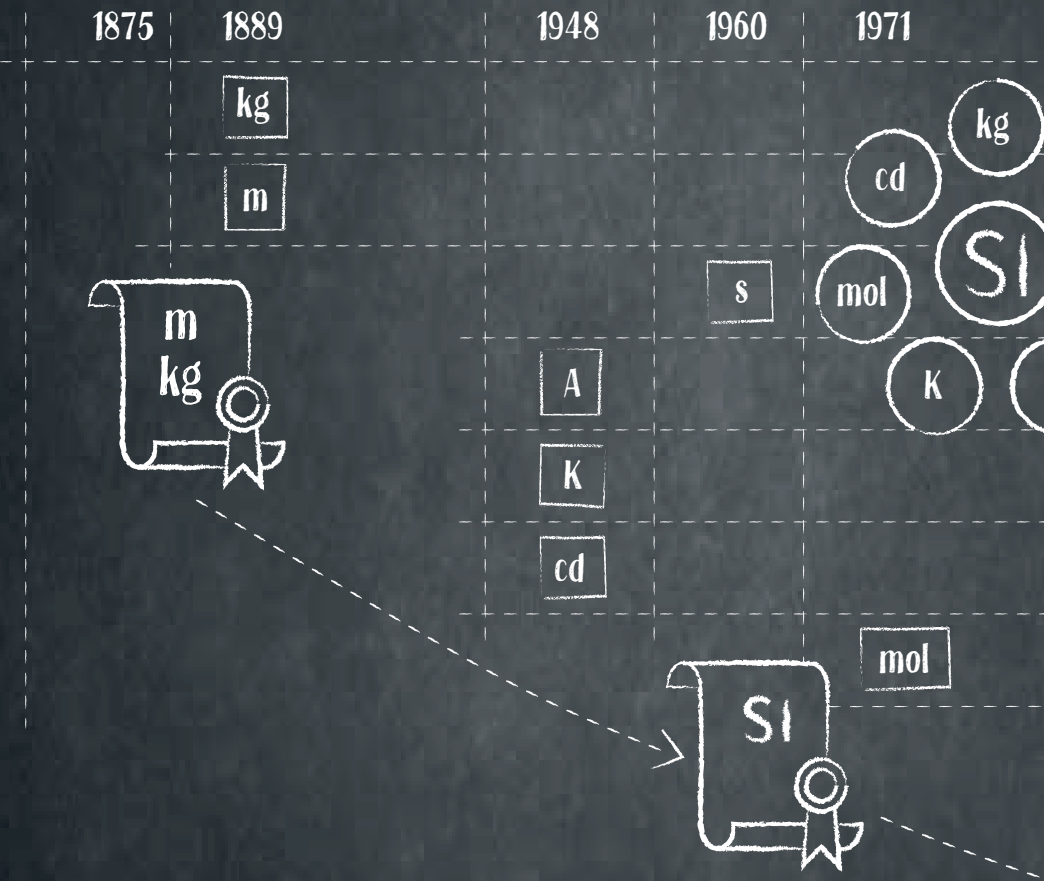
Kilogramme étalon



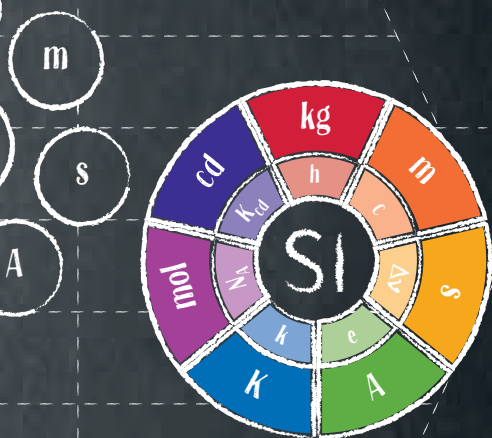
Mètre étalon



De la Convention du
Mètre au Système
international d'unités (SI)



2018



Un langage approprié est nécessaire pour pouvoir décrire des objets et des phénomènes. En sciences naturelles, les phénomènes fondamentaux de la nature sont décrits grâce aux mathématiques et à un système d'unités. De nos jours, le système d'unités le plus répandu dans le monde est le Système international d'unités (SI). Il s'agit d'un ensemble de règles qui définit les unités de mesure sans équivoque dans les sciences naturelles et la technique, et qui satisfait aux exigences du commerce et de la société.

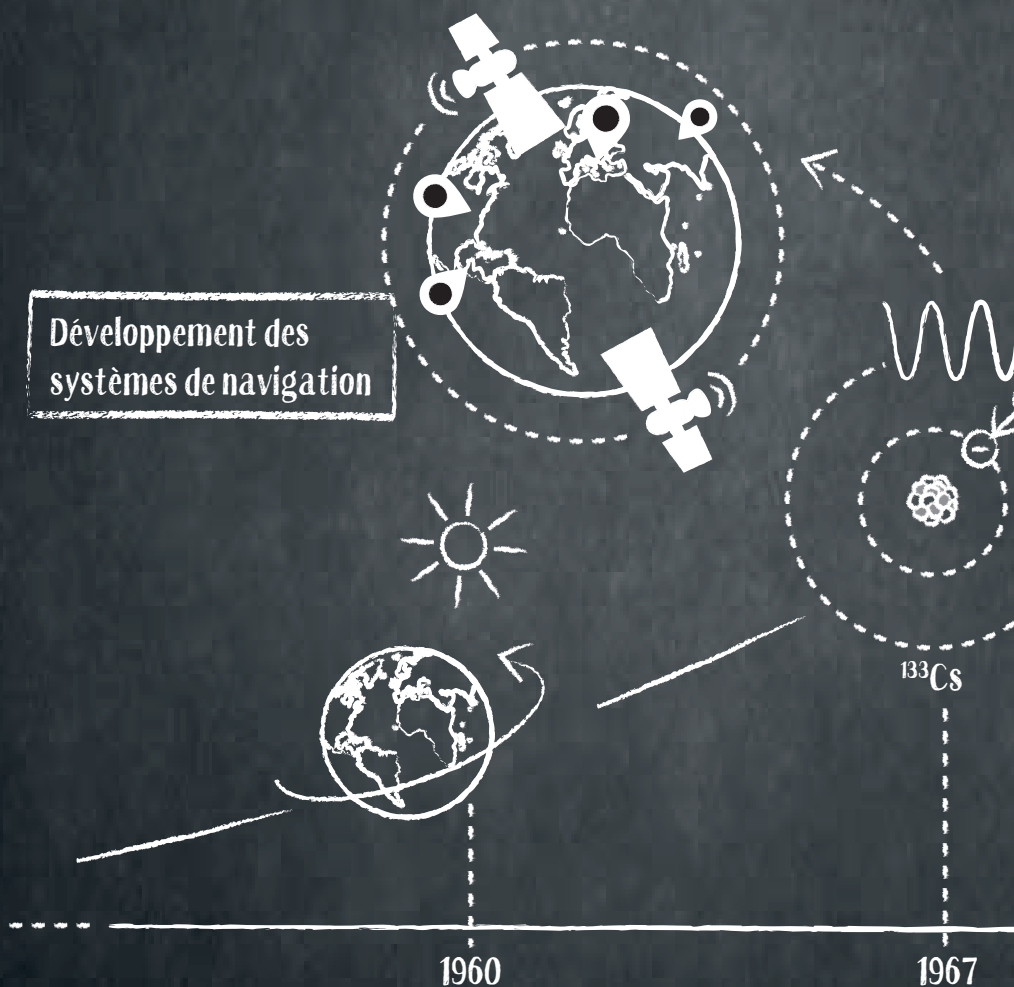
Le SI, adopté en 1960, se base sur le système métrique. Ayant vu le jour grâce à la Convention du Mètre (1875), il a remplacé différents systèmes d'unités et a ainsi rendu superflus les calculs complexes de conversion des unités de mesure. Le SI est aujourd'hui la base contraignante en ce qui concerne les mesures sur le plan mondial. Il se fondait initialement sur des unités de base qui étaient, dès 1971, la seconde, le mètre, le kilogramme, l'ampère, le kelvin, la candela et la mole. Toutes les autres unités pouvaient être déduites de ces unités de base.

Les définitions des unités de base du SI ont parfois dû être adaptées aux développements de la science et de la technique. C'était le seul moyen de satisfaire aux exigences toujours plus élevées en matière d'exactitude des mesures. Cette exactitude s'est donc améliorée de plusieurs ordres de grandeur.

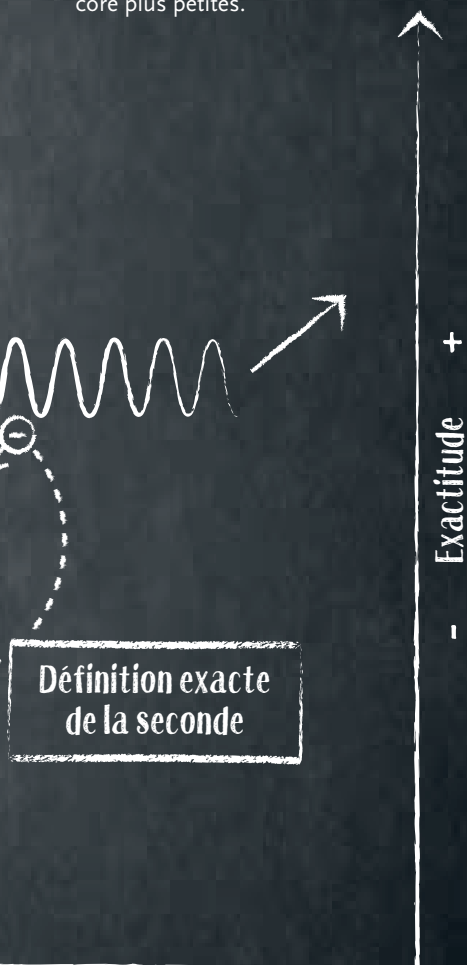
Le Système international d'unités, un système en constante évolution

Les progrès techniques et scientifiques ont toujours permis de réaliser les unités avec davantage d'exactitude, ce qui a donné lieu à des mesures plus exactes des grandeurs physiques correspondant à ces unités. Aucune mesure ne peut être plus précise que l'étalon utilisé. Dans certains cas, les progrès techniques ont entraîné une adaptation de la définition de certaines unités.

Par exemple, les unités de mesure de la longueur étaient initialement définies au moyen de mesures matérialisées, à savoir des artéfacts. Le prototype international du mètre (mètre étalon) a longtemps été déterminant pour l'unité mètre.



Sur la base de cette définition, les longueurs pouvaient être déterminées avec une exactitude de 10 micromètres (10 millièmes de mètre ou 1 centième de millimètre). Toutefois, la technique et la production industrielle ont nécessité avec le temps des mesures exactes de pièces encore plus petites.



La recherche de bases de mesure toujours plus exactes a finalement donné lieu à une définition de l'unité mètre basée sur une constante physique.

Le mètre est actuellement défini comme étant la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant un temps déterminé. La réalisation de l'unité mètre au moyen d'un laser spécial et stabilisé, un laser hélium-néon, permet de mesurer et de produire des pièces, par exemple dans l'industrie des semi-conducteurs, avec des tolérances de quelques nanomètres (milliardièmes de mètre).

De meilleures bases de mesure rendent possibles de nouvelles applications techniques. Depuis plus de 50 ans, l'unité de temps, à savoir la seconde, n'est plus définie en fonction de la rotation de la Terre, mais par la mesure d'une transition de l'atome de césium. Il est ainsi devenu possible de réaliser la seconde avec une extrême exactitude, ce qui a permis le développement de nouvelles technologies telles que les systèmes de navigation GPS. Cette application, utilisable au quotidien à partir de n'importe quel téléphone mobile, suppose en effet des synchronisations temporelles très exactes, que seules les horloges atomiques sont en mesure de fournir.

***« De meilleures bases
de mesure rendent
possibles de nouvelles
applications
techniques »***

Annexe

Préfixes SI

Facteurs	Noms	Symboles
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ³⁰	quetta	Q
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ²⁷	ronna	R
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ²⁴	yotta	Y
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ²¹	zetta	Z
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁸	exa	E
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ¹⁵	péta	P
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ¹²	téra	T
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ⁹	giga	G
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ⁶	méga	M
1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 = 10 ³	kilo	k
100 = 10 ²	hecto	h
10 = 10 ¹	déca	da
0.1 = 10 ⁻¹	déci	d
0.01 = 10 ⁻²	centi	c
0.001 = 10 ⁻³	milli	m
0.000 001 = 10 ⁻⁶	micro	μ
0.000 000 001 = 10 ⁻⁹	nano	n
0.000 000 000 001 = 10 ⁻¹²	pico	p
0.000 000 000 000 001 = 10 ⁻¹⁵	femto	f
0.000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻¹⁸	atto	a
0.000 000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻²¹	zepto	z
0.000 000 000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻²⁴	yocto	y
0.000 000 000 000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻²⁷	ronto	r
0.000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 = 10 ⁻³⁰	quecto	q

Multiples et sous-multiples décimaux

Les nombres supérieurs à 1 000 ou inférieurs à 0,001 prennent beaucoup de place et leur lecture est malaisée. C’est pourquoi le SI comporte des préfixes pour les multiples et sous-multiples. Ils sont écrits sans espace devant le symbole de l’unité. Le cumul des préfixes n’est pas autorisé. L’ensemble formé par le symbole d’un préfixe accolé au symbole d’une unité constitue un nouveau symbole insécable que l’on peut élever à une puissance. Les préfixes SI ne peuvent pas être utilisés avec les unités d’angle °, ’ et ′, les unités de temps min, h, d, les unités de surface a, ha, le carat métrique ct, et la dioptrie.

Exemples

12 000 N = 12 · 10³ N = 12 kN
0,000 05 s = 50 · 10⁻⁶ s = 50 µs
0,004 µm = 4 · 10⁻³ µm = 4 · 10⁻⁹ m = 4 nm
0,000 004 kg = 4 · 10⁻⁶ kg = 4 · 10⁻³ g = 4 mg

Expression des valeurs numériques des grandeurs physiques

	Exemple
en général $A = \{A\} \cdot [A]$	
A : grandeur physique, {A} : valeur numérique, [A] : unité	$\lambda = 3,896 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ou $\lambda = 389,6 \text{ nm}$
Comme séparateur décimal, selon ISO 80 000–1, soit la virgule soit le point peut être utilisé, selon les pratiques nationales out linguistiques.	3,896
Dans un texte, il devrait toujours être de façon interchangeable.	3.896
Dans le domaine scientifique et technique, les grands nombres sont séparés en groupes de trois chiffres pour faciliter la lecture.	4 867,219 1 au lieu de 4867,2191
En cas de doute sur les facteurs multiplicatifs, on introduit un signe de multiplication (point à mi-hauteur) ou un × (croix).	3,86 · 4,23 ou 3,86 × 4,23
Les indices supplémentaires de la grandeur sont accolés au symbole de la grandeur et non à celui de l’unité.	$U_{max} = 500 \text{ V}$ pas $U = 500 \text{ V}_{max}$
Les grandeurs physiques s’écrivent en italique, les unités et fonctions s’écrivent droit.	$p(h) = p_0 \exp(-h/8000 \text{ m})$

Définition des principales unités

Le Système international d'unités (SI) est le système d'unités dans lequel :

- la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, est égale à $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$
 - la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$,
 - la constante de Planck, h , est égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ J s}$ ($\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$),
 - la charge élémentaire, e , est égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$ ($\text{C} = \text{A s}$),
 - la constante de Boltzmann, k , est égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}\text{ J K}^{-1}$ ($\text{J K}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$),
 - la constante d'Avogadro, N_{A} , est égale à $6,022\,140\,76 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$,
 - l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$ K_{cd} , est égale à 683 lm W^{-1} ,
- où les unités hertz, joule, coulomb, lumen et watt, qui ont respectivement pour symbole Hz, J, C, lm, et W, sont reliées aux unités seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela, qui ont respectivement pour symbole s, m, kg, A, K, mol, et cd, selon les relations $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{A s}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, und $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Cette définition du SI permet de déduire la définition des principales unités.

Kilogramme

Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Mètre

Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à $299\,792\,458$ lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Seconde

La seconde, symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à $9\,192\,631\,770$ lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} .

Ampère

L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Kelvin

Le kelvin, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1} , unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Mole

La mole, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_{A} , lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1} .

Candela

La candela, symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$, K_{cd} , égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm W^{-1} , unité égale à cd sr W^{-1} , ou $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Impressum

Éditeur

Institut fédéral de métrologie METAS

Lindenweg 50, 3003 Bern-Wabern, Schweiz, Tél. +41 58 387 01 11, www.metas.ch

Langues

La présente brochure « Nos unités de mesure : le Système international d'unités (SI) » est publiée en français, allemand et italien.

Édition

Mai 2019

Remarque

La présente brochure a été rédigée avec le plus grand soin. Nous n'assumons cependant aucune responsabilité au sujet de l'exactitude, l'intégralité et l'actualité de son contenu.

Reproduction

autorisée avec indication de la source, justificatifs souhaités.

