

Métrologie

Un nouveau système d'unités de mesure pour le XXI^e siècle

Christophe Daussy, université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, CNRS

Révolution en vue à Versailles : la 26^e Conférence générale des poids et mesures, qui s'y déroulera du 13 au 16 novembre 2018, va changer la définition du kilogramme, du kelvin, de l'ampère et de la mole. C'est l'acte de naissance d'un système d'unités de mesure construit autour de sept constantes universelles, qui entrera en vigueur en mai prochain.

Qu'est-ce qu'un kilogramme ? Voilà une question que nous nous posons rarement car la réponse nous semble évidente : un kilo est un kilo. Pourtant, sa définition est sur le point de changer ! Aujourd'hui établi à partir d'un étalon fait de matière tangible, précieusement conservé dans un coffre-fort à Sèvres, près de Paris, le kilogramme sera désormais fondé sur des constantes physiques universelles. Rassurez-vous, tout change pour que rien ne change. En pratique, chez le primeur, le kilo de pommes restera le même. Cependant, la précision, la stabilité et la facilité d'usage des unités, pour les industriels ou les scientifiques, seront potentiellement accrues. Effectuer une

mesure, quelle qu'elle soit, revient à faire le rapport entre deux grandeurs qui ont la même dimension. En mesurant la longueur d'une table, vous pouvez par exemple trouver que celle-ci vaut 1,5 fois la longueur de votre mètre ruban. Ce rapport 1,5, sans dimension, contient l'information objective sur la longueur de la table. Mais, si vous souhaitez partager votre résultat, il vous faut préciser la longueur de votre mètre ruban dans une unité que tout le monde peut mettre en pratique. D'où la nécessité d'un étalon du mètre dans lequel tous ont confiance, et qui permet, par comparaison

de proche en proche, de certifier la longueur de tous les mètres rubans. C'est indispensable pour construire sans erreur des avions, dont les pièces sont produites partout dans le monde, comme pour mesurer universellement des distances astronomiques.

Une convention humaine

Un tel étalon n'a en soi rien d'objectif : c'est une convention humaine, une construction fondée sur la science de la mesure, la métrologie. L'histoire de notre système de mesure n'est pas terminée, elle va connaître un tournant majeur ce mois-ci : un nouveau ●●

Contexte

Le Système d'unités assure à tous la confiance dans les mesures. Depuis la Révolution française, il a subi des mutations successives, pour devenir de plus en plus stable et universel.



PHYSICIEN

Christophe Daussy est enseignant-chercheur au laboratoire de physique des lasers, où il est responsable du projet de mesure de la constante de Boltzmann et de la mise en pratique de la nouvelle unité de température.

▲ La balance du watt permet de mesurer la constante de Planck par rapport au kilogramme.

●●● Système international d'unités va être adopté en fixant les valeurs numériques de sept constantes physiques. Il entrera en vigueur en mai 2019.

Jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, beaucoup d'unités de mesure reposent sur une définition anthropomorphique (le pied, la coudée...). Bien que simples et immédiatement accessibles à tous, elles ont souvent une valeur géographique limitée et sont peu précises. Rien qu'en France, il en existait entre 700 et 800! Depuis plus de deux siècles, l'évolution de nos unités de mesure est guidée par la volonté de tendre vers un système de plus en plus stable et universel.

Les premières décisions en ce sens remontent à la Révolution française. Dans la nuit du 4 août 1789, le privilège d'étalonnage royal, à l'origine du très grand nombre d'unités en France, est aboli par un vote en séance de l'Assemblée constituante. Le 19 mars 1791, une commission nommée par l'Assemblée et composée de grands noms de la science (Borda, Laplace, Lagrange, Monge et Condorcet) présente à l'Académie des sciences son

rapport sur la définition de l'unité de longueur, dans lequel elle propose « l'idée de rapporter toutes les mesures à une unité de longueur prise dans la nature ». Cette proposition conduira à la redéfinition du mètre à partir d'un invariant de la nature, une fraction de la longueur du méridien terrestre. Une définition qui changera ensuite à de multiples reprises (lire ci-dessous).

La Convention du mètre, signée par 17 États le 20 mai 1793, crée les instances internationales faisant autorité dans le domaine de la métrologie : le Bureau international des poids et mesures (BIPM), le Comité international des poids et mesures (CIPM) et la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

Cette dernière institution se réunit tous les quatre ans et décide des évolutions successives du système d'unités. Ainsi, en 1960, le Système international d'unités, abrégé en SI, est adopté à l'occasion de la 11^e CGPM. Le SI comportait alors six unités de base, associées à six grandeurs de base : le mètre pour la longueur, le kilogramme pour la masse, la seconde pour le temps, l'ampère pour le courant



▲ Le prototype international du kilogramme, qui définissait jusqu'à présent l'unité de masse, est conservé depuis 1889 à Sèvres, près de Paris.

électrique, le kelvin pour la température thermodynamique et la candela pour l'intensité lumineuse. La mole est ajoutée en 1971 pour exprimer la quantité de matière, portant à sept le nombre d'unités de base du SI.

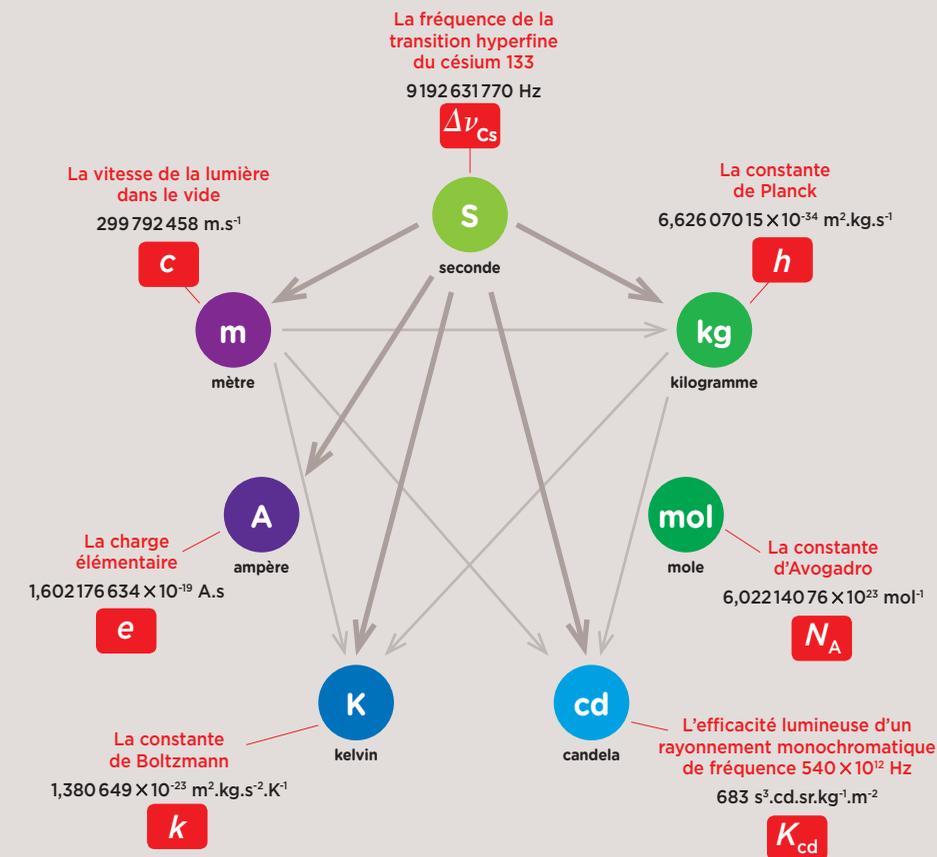
La présence d'unités comme la candela ou la mole n'est pas nécessaire du point de vue du physicien théoricien, mais elles ont été introduites et maintenues dans le SI pour répondre à des besoins de l'industrie et de la chimie expérimentale. Toutes les unités dérivées, par exemple le pascal (unité de pression), le watt (unité de puissance) ou le newton (unité de force), sont rattachées à ces sept unités de base.

La dérive de la masse

Les définitions des sept unités sont actuellement disparates. L'ampère et la candela reposent sur des expériences idéales. Ainsi, l'ampère correspond à 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. Les définitions de la seconde, du kelvin et de la mole reposent sur des systèmes physiques particuliers (respectivement l'atome de césium, le point triple de l'eau (*) et l'atome de carbone 12). Le mètre est fixé par une constante fondamentale (la vitesse de la lumière dans le vide). Enfin, un objet matériel particulier (le prototype international du kilogramme) définit l'unité de masse. Cette diversité ne va pas sans quelques problèmes. Même si la définition du kilogramme est conceptuellement la plus simple, c'est celle qui pose encore le plus de difficultés. C'est en effet la dernière unité qui repose sur un artefact,

Fig. 1 Sept constantes pour construire le nouveau système

► Contrairement à l'ancien Système international d'unités, qui reposait sur la définition explicite de chacune des sept unités de base (seconde, mètre, ampère, kelvin, candela, mole et kilogramme), le nouveau système se contente de poser les valeurs numériques exactes de sept constantes universelles (ci-contre en rouge). En combinant ces constantes, on peut construire pas à pas les unités de base. Tout d'abord la seconde, définie directement par $\Delta\nu_{Cs}$, qui s'exprime en hertz, l'inverse d'une seconde. Ensuite, la seconde, combinée avec la constante c donne le mètre, puisque le produit d'une vitesse par un temps a la dimension d'une longueur. Puis, à partir de la seconde et du mètre, le kilogramme est obtenu grâce à la constante de Planck h qui s'exprime en $m^2.kg/s$. Et ainsi de suite pour définir toutes les unités.



LES ÉVOLUTIONS DE LA DÉFINITION DU MÈTRE

En 1791, pendant la Révolution française, le mètre est défini comme étant égal à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. Lors d'une expédition de sept ans, Jean-Baptiste Delambre et Pierre-François Méchain mesurent cette portion de méridien entre Dunkerque et Barcelone, avant le dépôt, aux Archives de la République à Paris, de l'étalon en platine du mètre, en 1799. Après sa création en 1875, le BIPM assure l'établissement du système métrique à travers le monde. L'étalon du mètre est alors une barre en alliage de platine et d'iridium. Les évolutions technologiques dans le domaine de l'optique conduisent, en 1960, à adopter une nouvelle définition à partir

de la propriété invariante d'un atome, la longueur d'onde (dans le vide) correspondant à une transition entre deux états de l'atome de krypton 86. À la même époque, l'invention du laser qui permet de bien meilleures mesures des longueurs d'onde rendra cette définition caduque. En 1983, le mètre est donc redéfini en fixant la valeur d'un invariant le plus universel qui soit, une constante fondamentale de la physique. La valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide est fixée à 299 792 458 m/s exactement, conduisant ainsi à définir le mètre comme la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée égale à 1/299 792 458 s.

c'est-à-dire un objet physique, ici un cylindre de 4 cm de haut et de 4 cm de diamètre dans un alliage de platine et d'iridium, dont la masse vaut exactement un kilogramme par définition. Ce « grand K » reste sans lien direct évident avec un invariant de la nature, ce qui entraîne des problèmes d'accessibilité et de stabilité à long terme. Le prototype international du kilogramme, conservé depuis 1889 au BIPM à Sèvres, est ainsi à la fois la définition et l'unique réalisation pratique du kilogramme. La dissémination à travers le monde de l'unité est obtenue par la diffusion de copies, des étalons secondaires du grand K, dans les

différents laboratoires. Problème : la masse de chacun de ces artefacts change au cours du temps. Cet effet a été mis en évidence lors de plusieurs comparaisons internationales. Les masses des différentes copies ont dérivé de 30 à 50 microgrammes par rapport à la masse du grand K depuis 1889 (i). Cette dérive affecte bien sûr l'étalon primaire lui-même, mais, par convention, sa masse reste toujours d'un kilogramme ! Certes, cette dérive reste minime. La fiabilité sur la réalisation pratique du kilogramme est au niveau de 10^{-8} , suffisante pour des applications industrielles. Cette définition implique toutefois que la masse de particules comme

(*) Le point triple de l'eau correspond à un couple température-pression unique, pour lequel l'eau est à la fois solide, liquide et gazeuse.

le proton, quelque 10^{-27} kg , a potentiellement varié depuis 1889 ! Bien sûr, les physiciens savent à quoi s'en tenir face à cette convention, mais elle n'en reste pas moins insatisfaisante d'un point de vue conceptuel. Et, d'un point de vue pratique, que se passerait-il pour la traçabilité de notre système d'unités si le prototype international du kilogramme venait à être endommagé ou même à disparaître ? De plus, ces problèmes liés au kilogramme ont une incidence également sur d'autres unités. La définition de la mole, qui exprime la quantité de matière contenue dans 0,012 kg de carbone 12, fait appel à la définition du kilogramme. ●●●

●●● L'ampère et la candela en dépendent aussi, comme des grandeurs dérivées, telles la force, la pression ou la puissance.

Les unités électriques posent une autre difficulté majeure. L'expérience idéale, qui sert à définir l'ampère et qui nécessite la mesure d'une force mécanique, ne permet plus la réalisation pratique des unités électriques au meilleur niveau: le résultat de l'expérience, donc la réalisation pratique d'un ampère, varierait trop d'un laboratoire à l'autre par rapport aux exigences actuelles. Depuis plus d'un quart de siècle, les mesures électriques ont donc pris leur indépendance vis-à-vis de cette définition de l'ampère, sans que cela ne soit officialisé. Dans la pratique, ces mesures s'appuient sur des étalons de résistance et de tension reposant sur des effets quantiques, respectivement l'effet Hall quantique (*) dans un

semi-conducteur et l'effet Josephson (*) dans un supraconducteur à basse température.

Un rêve de longue date

Dernier exemple des limites du système d'unités actuel: la définition de l'unité de température, le kelvin. Elle stipule qu'un kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau (*). D'une part, cette définition érige l'eau en liquide de référence sans qu'il y ait de raison fondamentale à cela. D'autre part, ce point se trouve à une température proche de 0 °C sous une pression de 611 pascals. Si l'on veut par exemple étalonner un thermomètre qui fonctionne à plus de 1 000 °C, il est donc nécessaire de le raccorder par toute une chaîne de mesure à la température du point triple, ce qui pose de grandes difficultés et s'accompagne souvent

(*) **L'effet Hall quantique** se manifeste par la quantification de la résistance électrique lorsqu'un matériau est refroidi à très basse température en présence d'un fort champ magnétique.

(*) **L'effet Josephson** se révèle par des paliers de tension électrique lorsqu'une fine couche d'isolant, prise en sandwich entre deux plaques supraconductrices, reçoit une onde électromagnétique.

(*) **La constante de Planck** est introduite par la mécanique quantique et porte en elle la dualité onde-corpuscule.

d'une incertitude de mesure dégradée pour l'instrument.

Pour pallier ces difficultés, nous sommes aujourd'hui en train d'instaurer le premier système d'unités entièrement défini en fixant les valeurs numériques d'un jeu de constantes universelles. C'est un rêve de longue date. En 1874, lors de sa conférence devant l'association britannique pour l'avancement des sciences intitulée *À propos des unités de la nature*, le physicien irlandais George Johnstone Stoney introduit le premier système d'unités naturelles basé sur une liste de constantes fondamentales.

En 1906, Max Planck présente un système plus complet en introduisant la constante de Boltzmann (*) k et la constante de Planck (*) h . En combinant la vitesse de la lumière c , la constante de gravitation G , h et k , dont il fixe arbitrairement la valeur à 1, le physicien allemand définit un

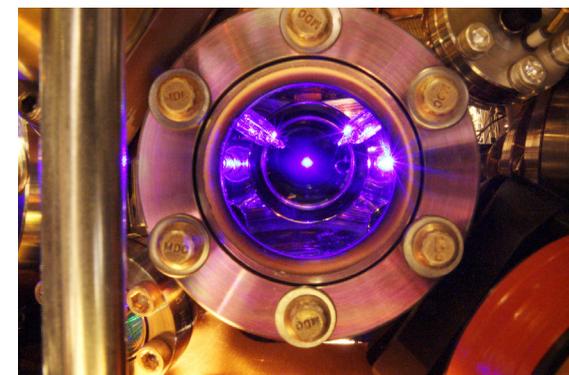
temps, une longueur, une masse et une température. Pourtant, le système de Planck présente plusieurs défauts rédhibitoires pour toute application. Par exemple, la longueur de Planck est de l'ordre de 10^{-35} mètre, en pratique impossible à réaliser! De plus, l'incertitude relative sur la mesure de la constante de gravitation G , de l'ordre de dix millionnièmes, est encore bien trop grande pour pouvoir fixer sa valeur sans fortement dégrader la précision des mesures dans le nouveau système d'unités (2).

Plus d'un siècle plus tard, après de nombreux débats entre physiciens théoriciens et métrologues sur le jeu le plus pertinent de constantes, les conditions pour établir un tel système d'unités sont enfin réunies. Les tests répétés et franchis avec succès par la théorie de la relativité et la

Des constantes fondamentales sont bien plus stables qu'un étalon fait de matière

physique quantique ont renforcé notre confiance dans le caractère fondamental de constantes comme c ou h , bien plus stables qu'un étalon fait de matière, fût-il conservé avec précaution! Mais comment choisir ces constantes? D'une part, il faut que les dimensions de ces constantes permettent, quand on les combine, de construire toutes les unités dont nous avons besoin. D'autre part, il faut s'assurer que l'on peut mesurer ces constantes assez précisément avant de fixer leur valeur afin d'assurer la continuité avec le système d'unités précédent et ne pas dégrader la qualité des mesures dans le nouveau SI.

En octobre 2017, le CIPM a recommandé la redéfinition de quatre unités de base (le kilogramme,



▲ La définition de la seconde pourrait évoluer, en se fondant sur une horloge optique, comme celle-ci, plutôt qu'à césium.

l'ampère, le kelvin et la mole) à partir de quatre constantes fondamentales: la constante de Planck h , la charge élémentaire e , la constante de Boltzmann k et la constante d'Avogadro N_A . Les valeurs numériques ainsi que leurs incertitudes ont été déterminées dans le SI actuel par le groupe CODATA (lire l'encadré p. 64).

Tout ne sera pas bouleversé: le mètre, la seconde, la candela reposent déjà sur des constantes fixées. Ainsi, la seconde est définie à partir de la fréquence de transition entre deux niveaux d'énergie de l'atome de césium, $\Delta\nu_{Cs}$. Selon la physique quantique, cette fréquence, c'est-à-dire l'inverse d'un temps, est une constante de la nature: elle est la même pour tous les atomes de césium de l'Univers. La seconde est aujourd'hui l'unité la mieux réalisée, avec une incertitude relative au niveau de 10^{-16} .

Néanmoins, la philosophie du système d'unités change en profondeur. En effet, il n'y a plus à strictement parler d'unités de base, chacune avec sa définition propre, et d'unités dérivées construites en combinant ces unités de base. Le nouveau SI pose un jeu de sept constantes dimensionnées. Ensuite, à chacun en fonction de ses besoins, de combiner ces constantes pour construire l'unité

nécessaire à sa mesure. Voici une illustration simple de ce changement si vous devez mesurer une vitesse: dans l'ancien SI, l'approche consistait à s'appuyer sur deux des sept unités de base, le mètre et la seconde, pour ensuite construire l'unité de vitesse en m/s. Le nouveau SI permettra d'être beaucoup plus direct en fondant l'unité de vitesse par rapport à la vitesse universelle de référence c . Cette approche offre une très grande souplesse. L'ancienne approche reste malgré tout importante et les sept unités de base peuvent être construites pas à pas à partir des sept constantes du nouveau SI (Fig. 1).

Définir un système d'unités à partir de constantes physiques est aussi un moyen très élégant pour déconnecter totalement la définition et la réalisation pratique des unités. Aucune approche expérimentale ou objet matériel particulier n'est imposé. Cela ouvre la possibilité de mettre à profit les progrès futurs de la science et de la technologie pour élaborer des étalons toujours plus performants, sans qu'il soit nécessaire de changer les définitions des unités.

Enfin, signe de l'universalité et de l'accessibilité du nouveau SI à l'échelle intergalactique: il vous suffirait de communiquer à un éventuel habitant de la galaxie d'Andromède, la définition et la valeur numérique de chacune des constantes pour qu'il puisse mettre en pratique les unités du SI!

Ce système pourra encore évoluer. En particulier, la seconde pourrait être à l'avenir redéfinie en se fondant sur des horloges « optiques » plutôt que sur des horloges à césium. Mais la 26^e Conférence générale des poids et mesures entérinera un système pérenne pour le XXI^e siècle. ■

(1) G. Girard, *Metrologia*, 31, 317, 1994.

(2) Q. Li et al., *Nature*, 560, 582, 2018.

« Pour fixer la constante de Planck, deux méthodes ont été utilisées »



FRANÇOIS NEZ
Physicien spécialiste de métrologie au laboratoire Kastler-Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France).

Les valeurs de la constante de Planck h , de la constante de Boltzmann k , de la charge élémentaire e et de la constante d'Avogadro N_A ont été déterminées par le groupe international de scientifiques du comité CODATA. Pour cela, nous avons examiné 134 résultats d'expériences qui mesurent ces constantes ou des combinaisons de celles-ci. Ensuite, nous avons cherché la meilleure estimation de 74 constantes, par la méthode des moindres carrés, qui ajuste au mieux la variété des résultats expérimentaux aux équations décrivant ces expériences, afin que l'ensemble soit cohérent. Plus l'incertitude sur le résultat d'une expérience est faible, plus ce résultat aura un poids important dans la valeur finale donnée à la constante. Par exemple, pour fixer la constante de Planck h avec 8 chiffres après la virgule, deux méthodes expérimentales indépendantes ont été utilisées. La première est la balance de Kibble, aussi appelée balance du watt. On équilibre d'abord un étalon, dont la masse en kilogramme est connue,

grâce à une force électrique créée par un courant circulant dans une bobine. Puis l'étalon est enlevé et la mesure de la tension aux bornes de la bobine permet de calibrer la géométrie de la balance. Or les références électriques quantiques servant à évaluer le courant et la tension mettent en jeu h . On a donc mesuré h par rapport au kilogramme.

L'autre méthode consiste à compter le nombre d'atomes dans une sphère quasi parfaite de silicium ultra-pur. Cela permet de déterminer la constante d'Avogadro N_A . Comme le produit de h par N_A est très bien connu par d'autres mesures de constantes fondamentales, connaissant N_A , on en déduit h .

À partir du 20 mai 2019, grâce à la nouvelle définition, le kilogramme pourra être réalisé concrètement dans différents laboratoires par une balance de Kibble ou une sphère de silicium. Cette fois-ci, h sera connue et la masse sera l'inconnue. Bien sûr, il faudra toujours vérifier la cohérence des différentes réalisations pratiques entre elles. Ce sera le rôle du BIPM. »

DR

JUN YE GROUP/JILA/NIST