

Le Système international d'unités redéfini

Lucile Julien (lucile.julien@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Le Système international d'unités (SI) est fondé sur sept unités de base qui sont le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd), respectivement unités de longueur, de masse, de temps, de courant électrique, de température, de quantité de matière et d'intensité lumineuse. Toutes les autres unités du SI sont des unités dérivées, qui se déduisent de ces unités de base.

Le choix et la définition des unités de base sont fixés par convention entre les États membres du BIPM. Ils font l'objet d'un accord écrit, qui s'accompagne ensuite de ce qu'on appelle des mises en pratique. La mise en pratique d'une définition est une série d'instructions, en général discutée par un comité consultatif avant d'être publiée par le BIPM, qui permet la réalisation concrète de cette définition, avec les meilleures qualités métrologiques possibles. Pour la dissémination des unités et l'étalement des appareils de mesure, on réalise des étalons : ce sont des artefacts matériels ou des dispositifs expérimentaux qui matérialisent l'unité d'une grandeur physique, avec une valeur connue et une exactitude qui peut être plus ou moins grande.

À l'occasion de la redéfinition de quatre d'entre elles, entrée en vigueur le 20 mai 2019, les sept unités de base du SI ont vu leur définition reformulée, comme nous allons le voir. Dans l'histoire des unités de mesures, ce n'est pas la première fois qu'une définition est modifiée, mais la refonte actuelle du SI est d'une ampleur particulièrement exceptionnelle. Nous donnons ci-dessous des exemples de définitions successives de certaines unités, ce qui est l'occasion de retracer brièvement l'histoire du SI et ses origines.

Du système métrique au système MKSA

Le système métrique décimal est né en France pendant la Révolution. À l'occasion des États généraux de 1789, le roi Louis XVI demande que des cahiers de doléances, ouverts dans toute la France, recueillent les vœux et suggestions de tous les habitants du royaume. Partout dans ces cahiers, on demande qu'il n'y ait plus « deux poids, deux mesures » : cette expression est restée dans le langage courant. En effet, non seulement chaque région possédait alors son propre système de mesures, différent pour chaque type de métier, mais la même unité pouvait avoir différentes variantes (toise de Charlemagne, toise du Châtelet, toise du Pérou...), ce qui était facilement source de tromperies dans les échanges commerciaux. En outre, la variété des subdivisions des différentes unités (par 20, par 12, par 8, par 6, par 3...) rendait les calculs extrêmement difficiles et inaccessibles à beaucoup de personnes.

Le 9 mars 1790, Talleyrand propose à l'Assemblée nationale un « Mémoire sur la nécessité de rendre uniformes dans tout le Royaume, toutes les mesures d'étendue et de pesanteur ». Il faut entendre par là les mesures de longueur et de poids, ce dernier n'étant alors pas distingué de la masse dans le langage commun. L'idée est de définir de nouvelles unités qui soient universelles, c'est-à-dire qui ne tiennent « à aucun climat, ni à aucune nation particulière ». Pour l'unité de longueur, le choix se porte sur le mètre, défini comme la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. L'unité de masse en est déduite, comme celle d'un décimètre cube d'eau distillée. La loi du 18 germinal de l'an III (7 avril 1795) institue le système métrique décimal.

Le Système international d'unités

Le Système international (SI) naît en 1960 à la 11^e CGPM, avec six unités de base (le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin et la candela). La septième unité de base est la mole qui n'est ajoutée qu'en 1971. Elle est définie comme « 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 ». Elle est donc reliée à l'unité de masse.

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est, quant à lui, introduit dès 1954, même si la formulation de sa définition a été revue depuis. C'est « la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». On peut remarquer que cette définition ne fait appel à aucune autre grandeur physique et est donc déconnectée de celle des autres unités de base.

Ce n'est pas le cas de la candela (cd), qui fait appel à une puissance, tout en prenant en compte la sensibilité de l'œil humain à la lumière. Depuis 1979, la candela est par définition « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian ». Exprimée en termes strictement physiques, elle s'appuie sur la constante $K_{cd} = 683 \text{ cd sr W}^{-1}$, mais elle sert pour la photométrie dont l'objectif est de mesurer la lumière en rendant compte de la sensation visuelle d'un observateur humain. Elle utilise donc une fonction d'efficacité spectrale $V(\lambda)$, dont la valeur maximale est 1 pour la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ (soit à 540 THz, dans le vert du spectre visible) où la sensibilité de l'œil est maximale. Cette fonction est définie par la Commission internationale de l'éclairage. L'unité de flux lumineux, le lumen, et celle d'éclairement lumineux, le lux, sont des unités dérivées de la candela ($1 \text{ lumen} = 1 \text{ cd sr}$; $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen m}^{-2}$).

Les atomes pour définir la seconde et le mètre

En 1960, la 11^e CGPM décide d'abandonner la définition de la seconde à partir de la durée du jour solaire moyen ; en effet la rotation de la Terre présente des irrégularités, nettement visibles avec les oscillateurs à quartz de plus en plus stables

dont on dispose alors. Elle choisit une nouvelle définition proposée par l'Union astronomique internationale : « la fraction 1/31 556 925,947 de l'année tropique 1900 » (l'année tropique est définie comme l'intervalle de temps, sur Terre, pour que le Soleil retourne à la même position apparente dans le cycle des saisons). Mais cette définition, peu commode, sera rapidement abandonnée.

En 1967, la 13^e CGPM constate que cette définition de la seconde « ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie », et 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 » ; elle décide donc de redéfinir la seconde (s) comme « 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 ». La fréquence (dans le domaine des micro-ondes) de la transition hyperfine de l'atome de césium prend donc une valeur fixée. Cette définition est toujours en vigueur et permet actuellement de réaliser la seconde avec un niveau d'exactitude d'environ 2×10^{-16} avec des fontaines à atomes froids. Remarquons que l'idéal d'universalité recherché par les révolutionnaires français est bien présent dans cette définition. En effet, tous les atomes du même isotope d'un même élément chimique ont les mêmes propriétés, qui sont universelles.

Avant la seconde, le mètre a été redéfini en 1960 non plus comme la longueur du prototype international de 1889, mais à partir d'une longueur d'onde atomique. La 11^e CGPM a en effet décidé que le mètre était « 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 ». La longueur d'onde de la raie orangée du krypton 86 se trouve ainsi fixée. En pratique, elle est fournie par une lampe à décharge et cette raie possède une certaine largeur.

Il se trouve que l'année 1960 est aussi celle de fonctionnement du premier laser et que les lasers, qui vont se développer rapidement dans les années qui suivent, ont une largeur spectrale bien plus étroite que celle des lampes. Les lasers vont devenir des références de longueurs d'onde et de fréquences, qu'on saura mesurer de plus en plus précisément. Pour une radiation

donnée se propageant dans le vide, le produit de la longueur d'onde par la fréquence donne la vitesse de la lumière c . Des déterminations de cette vitesse vont ainsi être réalisées, mais dont l'incertitude de quelques 10^{-9} est limitée non par les dispositifs de mesure (interférométrie et chaînes de fréquences) mais par l'étalon de longueur lui-même, la lampe à krypton. Une fois encore, quand l'étalon est le facteur limitant d'une mesure, c'est qu'il est temps d'en changer.

En 1983, la 17^e CGPM attribue une valeur exacte à la vitesse de la lumière c , en redéfinissant le mètre comme : « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde ». Le mètre se trouve ainsi raccordé à la seconde et il n'y a plus qu'un seul étalon, l'horloge à césium, pour les longueurs et les temps (ou fréquences). La réalisation pratique du mètre peut être obtenue avec un laser et une horloge : on utilise par exemple des lasers continus de fréquence connue pour mesurer des petites distances par interférométrie ; ou bien des lasers en impulsions pour déduire une distance macroscopique du temps mis par la lumière pour la parcourir.

Les unités qui ne changent pas

Parmi les sept unités de base du système international, la seconde, le mètre et la candela ne sont pas modifiés en 2019, même si leurs définitions sont reformulées. Comme nous l'avons vu plus haut, elles font intervenir des valeurs numériques fixées pour :

- la fréquence de la transition hyperfine du césium 133, $\Delta\nu_{Cs} = 9 192 631 770 \text{ Hz}$, qui intervient dans la définition de la seconde ;
- la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299 792 458 \text{ m s}^{-1}$, qui intervient dans la définition du mètre ;
- la constante $K_{cd} = 683 \text{ lumen W}^{-1}$, qui intervient dans la définition de la candela.

Cependant, leurs définitions sont réécrites avec une nouvelle formulation dite « à constante explicite ». Par exemple, la définition du mètre est maintenant la suivante : « 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

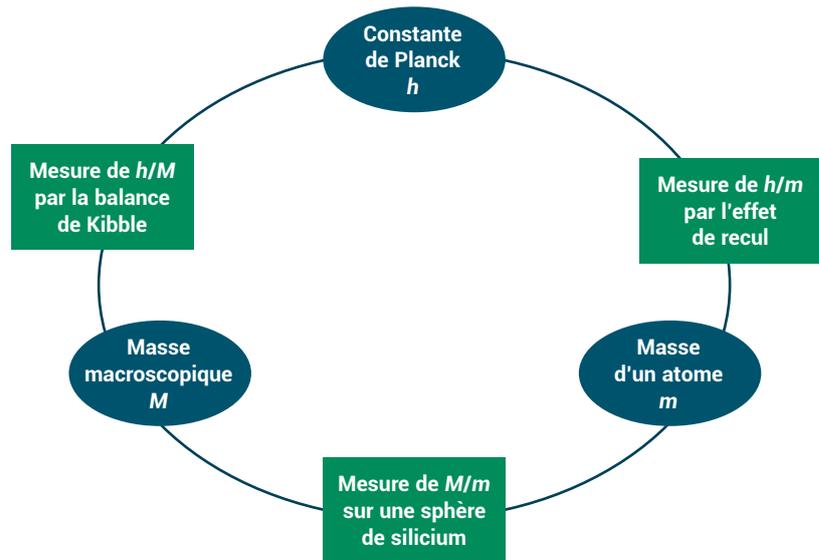
étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.» Les définitions de chacune des sept unités de base sont maintenant formulées selon ce même modèle.

Les unités qu'il fallait changer

Ces dernières années, le prototype international du kilogramme (IPK, noté avec la lettre \mathcal{K}) était le seul artefact matériel encore utilisé pour définir une unité de base du SI. Conservé au BIPM depuis 1889, il a été depuis cette date comparé trois fois à ses six copies témoins officielles. La dernière comparaison, réalisée en 2014, a confirmé une différence de $35 \mu\text{g}$ (soit $3,5 \cdot 10^{-8}$ en valeur relative) entre IPK et la moyenne de ces copies, ce qui laisse penser que la quantité de matière qu'il contient a sans doute changé depuis sa fabrication, même si sa masse restait 1 kg par définition. La référence à un prototype international unique pour les masses a de nombreux inconvénients, explicités dans l'article de M. Thomas *et al.* (p. 18), parmi lesquels le risque de détérioration ou de destruction accidentelle. De l'avis de tous, il était temps de changer la définition du kilogramme. Une possibilité aurait été de rattacher celui-ci à une masse microscopique, le carbone 12 par exemple, en fixant la valeur de la constante d'Avogadro N_A . Un autre choix a été fait, qui est de fixer la valeur de la constante de Planck h .

Cependant, à l'occasion de la refonte du SI, et comme il est maintenant possible de mieux relier les masses macroscopiques aux masses microscopiques, il a été décidé de redéfinir également la mole en fixant la valeur de N_A .

La définition de l'ampère nécessitait elle aussi d'être revisitée. La réalisation pratique de cette unité ne pouvant se faire directement avec les « deux fils infinis » intervenant dans sa définition, on utilisait des dispositifs mécaniques pour réaliser d'une part le volt et d'autre part l'ohm, et à partir d'eux l'ampère. De tels dispositifs ne permettent pas d'obtenir une exactitude meilleure que quelques 10^{-7} . C'est pourquoi, depuis 1990, ce sont deux phénomènes quantiques macroscopiques qui servaient en pratique de références dans les laboratoires : l'effet Josephson pour les tensions et l'effet Hall quantique pour les résistances (voir l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25). Une jonction



2. Deux types d'expériences donnent accès au rapport entre h et une masse : la balance de Kibble pour les masses macroscopiques, en passant par les unités électriques, et l'effet de recul d'un atome pour les masses microscopiques. Le comptage du nombre d'atomes dans une sphère de silicium permet de faire le lien entre une masse macroscopique et la masse d'un atome.

Josephson est un convertisseur fréquence-tension. La constante de proportionnalité est la constante de Josephson donnée par $K_J = 2e/h$, où e est la charge électrique élémentaire. L'effet Hall quantique, quant à lui, fournit des paliers de résistance donnés par les sous-multiples de $R_K = h/e^2$. La stabilité de ces deux types de dispositifs, meilleure que 10^{-9} , est telle qu'ils ont été choisis par la CGPM en 1987 pour servir de références pour les mesures de tension et de résistance en donnant des valeurs conventionnelles à K_J et R_K . Ces valeurs sont utilisées pour la métrologie électrique depuis 1990. Depuis cette date, les mesures électriques de haute précision n'utilisaient donc plus comme référence la définition de l'ampère : les unités électriques avaient repris leur indépendance par rapport au SI.

Enfin, la définition du kelvin, en faisant appel à une température particulière, celle du point triple de l'eau, posait la question de la mesure dans des gammes de température très éloignées de celle-ci. On utilisait en pratique des phénomènes variés dans lesquels une loi physique dépend de la température (pression dans un gaz, résistance de platine, rayonnement du corps noir, etc.), mais les erreurs d'étalonnage des thermomètres étaient d'autant plus importantes qu'on s'éloignait du point triple de l'eau.

Comment quatre unités ont été redéfinies

En 2011, la 24^e CGPM a pris acte, dans sa Résolution 1, du projet de redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin en fixant les valeurs numériques de quatre constantes de la physique : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Elle a alors encouragé les chercheurs du monde entier à mesurer le plus précisément possible ces quatre constantes dans le cadre du SI en cours [1].

Pour la constante de Planck h , on peut utiliser la balance de Kibble qui permet de comparer une puissance électrique à une puissance mécanique (voir l'article de M. Thomas *et al.*, p. 18). En s'appuyant sur les relations donnant R_K et K_J , cette balance donne accès au rapport h/M entre la constante de Planck et une masse étalon avec une incertitude de quelques 10^{-8} . On a donc pu déterminer h avec cette balance en se référant à l'étalon du kg.

Pour la constante d'Avogadro N_A , la mesure a été réalisée par la collaboration internationale IAC (International Avogadro Constant) en comptant le nombre d'atomes dans une sphère de silicium 28 et en se référant à la masse molaire du silicium, précisément comparée à celle du carbone 12 (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22).

En pratique, la valeur de la constante de Planck a été déterminée à partir de deux types de mesures : celles données par différentes balances de Kibble dans le monde, mais aussi celle déduite de l'étude de la sphère de silicium par la collaboration IAC, en s'appuyant sur les mesures de l'effet de recul sur des atomes froids (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22). Cet effet de recul donne en effet accès au rapport h/m entre la constante de Planck et la masse m d'un atome, tandis que la sphère de silicium donne le rapport entre la masse macroscopique de la sphère et la masse d'un atome qui la compose. Les deux voies indépendantes pour obtenir h , dont l'une passe par les unités électriques et l'autre non, ont donné des résultats en bon accord et avec des incertitudes relatives comparables d'un peu plus de 10^{-8} . Le lien entre elles est illustré sur la figure 2.

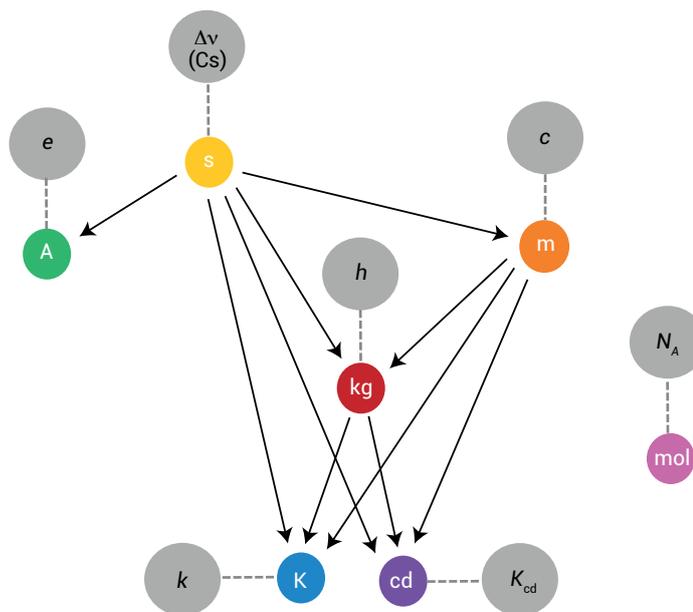
La valeur de la constante de Planck étant déterminée, on a pu en déduire celle de la charge élémentaire e à partir de l'expression de la constante de structure fine $\alpha = e^2/2\epsilon_0hc$ qui est connue expérimentalement avec une grande précision (voir P. Cladé et L. Julien, *Reflets de la physique*, 59 (2018) 4-9).

Enfin, trois types d'expériences ont contribué à la détermination de la constante de Boltzmann k . Elles consistaient à mesurer l'une ou l'autre des grandeurs suivantes, en se référant au point triple de l'eau : la constante diélectrique de l'hélium, l'amplitude du bruit thermique dans un conducteur (bruit Johnson), ou la vitesse du son dans un gaz parfait (thermométrie acoustique). C'est ce dernier type d'expérience qui a donné les résultats les plus précis. Il a été mis en œuvre au LNE-CNAM et est décrit dans l'article de L. Pitre *et al.* (p. 29).

À la suite de l'ajustement des constantes fondamentales réalisé par le CODATA en 2017 (voir l'article de F. Nez, p. 17) et de la proposition du CIPM réuni en octobre de cette même année, la 26^e CGPM a entériné le choix des valeurs numériques suivantes pour la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann :

- $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
- $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
- $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J K⁻¹

Ce faisant, quatre autres constantes ont perdu leurs valeurs numériques exactes et seront susceptibles d'être remesurées à l'avenir :



3. Relations de dépendance entre les unités du nouveau SI et les constantes physiques fondamentales. Dans le nouveau SI, toutes les unités de base sauf la mole sont définies à partir de la seconde. Avec les valeurs numériques fixées de c et e , l'ampère et le mètre se déduisent de la seconde. Avec la valeur de h , le kilogramme se déduit de la seconde et du mètre, puis, en fixant les valeurs de k et K_{cd} , le kelvin et la candela se déduisent de la seconde, du mètre et du kilogramme. La mole, elle, est déconnectée des autres unités.

- la masse du prototype international \mathcal{K} , qui ne vaudra plus exactement 1 kg,
- la perméabilité du vide, qui ne vaudra plus exactement $4\pi \cdot 10^{-7}$ en unités SI,
- la masse molaire du carbone 12, qui ne vaudra plus exactement $12 \cdot 10^{-3}$ kg,
- la température du point triple de l'eau qui ne sera plus exactement 273,16 K.

De façon générale, les dispositifs qui ont servi à mesurer jusqu'ici les valeurs des constantes h , e , N_A et k en utilisant les anciens étalons pourront être utilisés à l'avenir pour la réalisation des unités redéfinies : par exemple la balance de Kibble, avec la valeur fixée de h , permettra de mesurer des masses macroscopiques, et la vitesse du son dans un gaz parfait, avec la valeur fixée de k , permettra de mesurer des températures.

Les quatre unités redéfinies par la 26^e CGPM, comme celles qui ne changent pas, ont des nouvelles définitions exprimées avec des formulations « à constante explicite » (www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1/), par exemple : « 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 équivalente au $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{Cs}$ ».

Avec leurs nouvelles définitions, le kilogramme, l'ampère et le kelvin, comme le mètre et la candela, sont définis à partir de la seconde : cette relation de dépendance est illustrée dans la figure 3. La mole se trouve déconnectée du kilogramme, comme elle l'était déjà des autres unités ; de son côté, le kelvin fait le chemin inverse en se raccordant aux unités mécaniques. Le kilogramme étalon de 1889 devient un objet de musée, comme l'a été avant lui le mètre étalon.

Dans quelques années, la seconde sera à nouveau redéfinie grâce aux progrès spectaculaires des horloges optiques. La fréquence d'une nouvelle transition atomique sera fixée, non plus dans le domaine micro-onde mais dans le domaine optique. Mais la nouvelle définition n'affectera pas celles des autres unités de base du SI, qui continueront à en découler de la même façon.

Le nouveau SI constitue un ensemble cohérent ; en s'appuyant sur des constantes de la nature, il répond encore mieux au vœu d'universalité qui avait inspiré la création du système métrique. ■

Référence

1 • P.J. Mohr *et al.*, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* 55 (2018) 125-146.