

### La mole redéfinie en 2019 comme le kilogramme, l'ampère et le kelvin

La 26<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) s'est tenue à Versailles du 13 au 16 novembre dernier, réunissant les représentants de la plupart des 59 États membres du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et des 43 États associés. Lors de sa séance publique solennelle du 16 novembre [1], elle a entériné la proposition faite par le Comité international des poids et mesures (CIPM) de redéfinir quatre des unités de base du système international (SI) : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin. Les nouvelles définitions de ces unités attribuent maintenant des valeurs numériques fixées à quatre constantes : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Le nouveau SI est entré en application le 20 mai 2019.

*Cet article est adapté d'un article original issu du dossier « Le nouveau Système international d'unités : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin redéfinis » publié dans le numéro 62 (mai-juin 2019) de Reflets de la physique\*.*

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, voté par la CGPM. 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-après quelques exemples de changements de définitions de certaines unités, ce qui est l'occasion de retracer brièvement l'histoire du SI et ses origines.

#### Du système métrique au système international

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 », expression qui 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 plusieurs 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 pour 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 an III (7 avril 1795) institue le système métrique décimal. À la suite de la mesure du méridien terrestre de Dunkerque à Barcelone par Delambre et Méchain, un mètre étalon et un kilogramme étalon prototypes sont réalisés en platine et déposés aux Archives de la République en 1799. Ce n'est cependant que le 1<sup>er</sup> janvier 1840 que l'usage du système métrique est rendu obligatoire en France.

En 1875 est signée la Convention du mètre, traité international qui crée le BIPM et réunit alors 17 États membres (59 actuellement). La première CGPM se réunit en 1889 : à cette occasion, deux nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme sont réalisés en platine iridié (90 % d'iridium, 10 % de platine) et déposés dans les locaux du BIPM à Sèvres. Avec la seconde définie par les astronomes comme « la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen », ils sont la base du système d'unités mécaniques MKS. Celui-ci s'élargira aux unités électriques dans un système cohérent en 1948, lors de la 9<sup>e</sup> CGPM. L'ampère est alors pris comme unité de base aux côtés du mètre, du kilogramme et de la seconde, ce qui constitue le système d'unités MKSA. Il est défini comme « 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  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur ». Cette définition, restée en vigueur jusqu'ici, donne à la perméabilité du vide  $\mu_0$  la valeur exacte de  $4\pi \times 10^{-7}$ .

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est introduit en 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.

Ce n'est pas le cas de la candela, 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  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian ».

Le système international (SI) naît en 1960 lors de la 11<sup>e</sup> CGPM, avec six unités de base. 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 » et est donc reliée à l'unité de masse.

### Les redéfinitions du mètre et de la seconde

En 1967, la 13<sup>e</sup> CGPM constate que « le moment est venu de remplacer la définition de l'unité de temps du Système international d'unités par une définition atomique » et elle décide donc de redéfinir la seconde 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 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  $2 \times 10^{-16}$  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 d'un même élément chimique ont les mêmes propriétés, qui sont universelles.

À partir de l'année 1960, qui est celle du fonctionnement du premier laser, les lasers vont se développer rapidement et devenir des références de longueurs d'onde et de fréquences. 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  $c$ . En 1983, la 17<sup>e</sup> CGPM attribue une valeur exacte à  $c$  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).

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

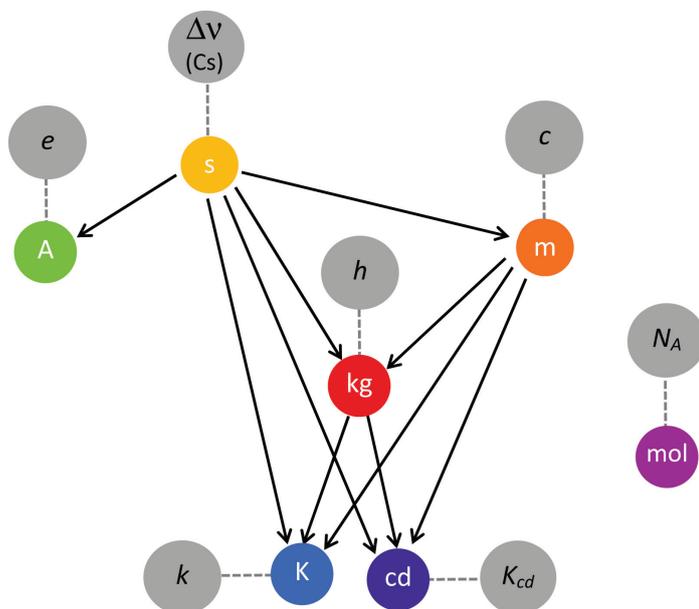
Cependant, leurs définitions sont réécrites avec une nouvelle formulation dite « à constante explicite ». Par exemple, la définition du mètre est maintenant la suivante : « Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière 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.



Timbre représentant un ange républicain mesurant un arc de méridien terrestre, émis en 1954 à l'occasion de la 10<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures. Il illustre la devise du système métrique : « À tous les temps, à tous les peuples ».

### Les unités qu'il fallait changer

Ces dernières années, le prototype international du kilogramme (IPK) 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 officielles témoins. La dernière intercomparaison, réalisée en 2014, a confirmé une différence de 35  $\mu\text{g}$  (soit  $3,5 \times 10^{-8}$  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, 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 on sait maintenant relier de mieux en mieux 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



Dans le nouveau système international, toutes les unités 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.

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  $10^{-7}$ . 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, avec des dispositifs dont la stabilité est meilleure que  $10^{-9}$ . 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 : les erreurs d'étalonnage des thermomètres étaient d'autant plus importantes qu'on s'éloignait de ce point triple.

### Comment quatre unités ont été redéfinies

En 2011, la 24<sup>e</sup> 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.

La constante d'Avogadro  $N_A$  a été mesurée en comptant le nombre d'atomes dans une sphère de silicium 28. Les étapes successives de cette expérience, réalisées par les différentes équipes de la collaboration internationale IAC (International Avogadro Constant) sont les suivantes :

- préparation d'un lingot de silicium 28 presque pur : formation de  $\text{SiF}_4$  gazeux en faisant réagir du fluor sur du silicium naturel (Si 28, 29 et 30), séparation isotopique par centrifugation, puis réduction et fusion d'un lingot de métal qui est découpé en plusieurs échantillons ;

- étude d'un échantillon au spectromètre de masse : de sa composition isotopique on déduit sa masse molaire moyenne  $M(\text{Si})$  ;

- analyse d'un échantillon par interférométrie X : mesure de la distance entre plans atomiques et détermination de la taille de la maille cristalline  $a^3$  ;

- usinage et polissage d'une sphère presque parfaite, dont le diamètre est mesuré par interférométrie optique ;

- pesée de la sphère avec une balance de précision.

Des différentes données, on a pu déduire la masse volumique de la sphère, puis à partir de celle-ci et de sa masse molaire moyenne, son volume molaire. Comme on a mesuré également le volume de la maille cristalline, on en déduit la constante d'Avogadro. Celle-ci a ainsi été déterminée avec une incertitude de  $1,2 \times 10^{-8}$  [2].

À la suite de toutes les mesures réalisées jusqu'au 30 juin 2017, il a été proposé de fixer les valeurs numériques suivantes pour la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann :

- $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$

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

- $N_A = 6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

- $K = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Ce choix a été entériné par la 26<sup>e</sup> CGPM en novembre dernier. Les quatre unités redéfinies, comme celles qui ne changent pas, ont des nouvelles définitions exprimées avec des formulations « à constante explicite » [3], par exemple :

« 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  $\text{mol}^{-1}$  ».

Avec leurs nouvelles définitions, le kilogramme, l'ampère et le kelvin, comme le mètre et la candela sont définis à partir de la seconde. La mole se trouve maintenant déconnectée du kilogramme, comme elle l'était déjà des autres unités ; de son côté, le kelvin a 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.

Le nouveau système international 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.

\* [www.refletsdelaphysique.fr](http://www.refletsdelaphysique.fr), dossier accessible librement au format pdf.

[1] [www.youtube.com/watch?v=gimwAPQbHOw&index=4&list=PL-vj-3\\_a7wTDeKEupZSX7Tw42yReNgJLI](https://www.youtube.com/watch?v=gimwAPQbHOw&index=4&list=PL-vj-3_a7wTDeKEupZSX7Tw42yReNgJLI)

[2] Bartl G. *et al.*, A new  $^{28}\text{Si}$  single crystal: counting the atoms for the new kilogram definition, *Metrologia*, 2017, 54, p. 693.

[3] [www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1](http://www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1)

**Lucile JULIEN**,  
professeure émérite à Sorbonne Université, Laboratoire Kastler  
Brossel, Paris.

\* [lucile.julien@lkb.upmc.fr](mailto:lucile.julien@lkb.upmc.fr)