

HISTOIRE

Le SI, système international d'unités, des origines jusqu'au 20^e siècle

Lucile Julien Professeure émérite à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)
Laboratoire Kastler Brossel.

Le système international d'unités n'est pas figé. Il a une histoire et les définitions de ses unités de base s'adaptent aux besoins de chaque époque. La dernière redéfinition d'une d'entre elles est celle du mètre en 1983. Une redéfinition de quatre autres se prépare pour 2018.

Ce premier article présente le SI aujourd'hui et retrace brièvement son histoire, depuis ses origines jusqu'au 20^e siècle.

Le SI aujourd'hui

Le système international d'unités (SI) est né en 1960. Il est fondé sur sept unités de base : le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd). Les grandeurs physiques exprimées avec ces unités sont la longueur, la masse, le temps, l'intensité de courant électrique, la température, la quantité de matière et l'intensité lumineuse. Les unités de toutes les autres grandeurs physiques sont des unités dérivées, qu'on peut écrire en fonction des unités de base. Par exemple l'ohm, unité de résistance électrique, est donné par le $\text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \text{A}^{-2}$. Écrire l'équation aux dimensions d'une grandeur physique, c'est exprimer celle-ci en fonction des sept grandeurs de base ci-dessus.

Le SI n'est pas statique : il évolue en fonction des besoins croissants des utilisateurs. La définition de chaque unité est fixée par convention entre les états représentés à la *Conférence générale des poids et mesures* (CGPM), conférence qui se réunit actuellement environ tous les quatre ans. Les 24^e et 25^e CGPM, réunies en 2011 et 2014, ont acté un projet de redéfinition des unités de base maintenant prévu pour 2018, qui devrait concerner tout particulièrement le kilogramme, l'ampère, le kelvin et la mole. Pour comprendre ce projet, il est utile de revenir sur l'évolution passée du SI.

Petite histoire du SI, du système métrique au système MKS

Le système international est le descendant du système métrique décimal, créé et adopté en France en 1795. Avant cette époque, chaque région

possédait son propre système de mesure, et une même unité – la toise par exemple comme unité de longueur – pouvait avoir des valeurs différentes selon les époques ou les lieux : toise de Charlemagne, toise du Châtelet, toise du Pérou... Enfin, selon les cas, les unités pouvaient se diviser par exemple en 20, en 12, en 8, en 6, ou en 3... Les cahiers de doléance proposés aux Français en 1788 mentionnent partout la demande qu'il n'y ait plus "deux poids, deux mesures", expression qui est restée dans le langage courant. L'unification demandée alors dans ces termes est celle des unités de masse, non distinguée du poids à l'époque, et de longueur.

En mars 1790, l'Assemblée nationale vote la suppression des droits féodaux sur les poids et mesures et l'idée de créer des unités nouvelles est lancée. Ces unités doivent être universelles, c'est-à-dire faites pour tous les peuples de la Terre. L'année suivante, il est décidé par les révolutionnaires français que la nouvelle unité de longueur serait le mètre, défini comme « la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre » et que le kilogramme – d'abord appelé le grave – s'en déduirait, comme le poids d'un décimètre cube d'eau à la température où sa densité est maximale.

Jean-Baptiste Delambre et Pierre Méchain quittent Paris en mai 1792 pour aller chacun de son côté mesurer par triangulation une partie du méridien terrestre entre Dunkerque et Barcelone. Ils ne seront de retour ensemble à Paris qu'en novembre 1798, après avoir affronté des conditions matérielles et politiques particulièrement difficiles. Pendant le même temps, Lavoisier réalise des mesures très précises de volumes et de masses d'eau, mais est guillotiné en mai 1794 !

Sans attendre le retour de Delambre et Méchain, le système métrique décimal est institué en avril 1795 et des copies d'un mètre étalon et d'un kilogramme étalon provisoires sont diffusées dans toute la France, accompagnées d'explications et d'instructions (figure 1).

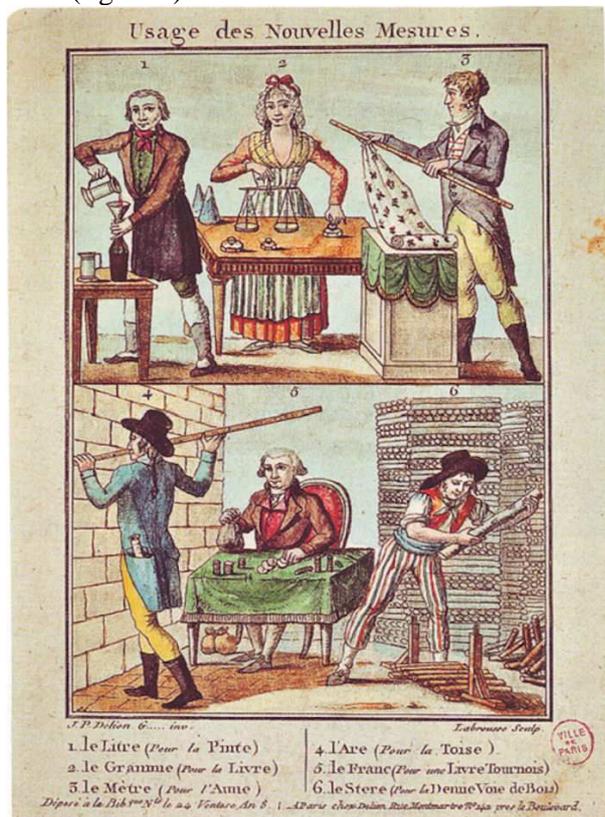


Fig.1. Instructions diffusées en 1795 dans toute la France lors de l'instauration du système métrique décimal.

En 1799, deux prototypes « définitifs » du mètre et du kilogramme sont réalisés en platine et déposés aux Archives de la République.

Au cours du 19^e siècle, de nombreux pays adoptent le système métrique. En 1875, est signée la *Convention du mètre*, traité international qui réunit 17 pays (ils sont 55 actuellement) et qui crée le *Bureau international des poids et mesures* (BIPM), sous l'autorité de la *Conférence générale des poids et mesures*. En 1889, à l'occasion de la 1^{ère} CGPM, deux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme (figure 2) sont réalisés en platine iridié (90 % Pt, 10 % Ir) et déposés à Sèvres, au siège du BIPM.

Avec la seconde dite « des astronomes », ces trois unités forment le système d'unités mécaniques MKS. Le mètre et le kilogramme sont définis respectivement comme la longueur et la masse des deux prototypes internationaux, tandis que la seconde est « la fraction 1/86 400 du jour solaire moyen ».



Fig.2. Photo d'une des copies du prototype international du kilogramme, déposé au BIPM.

Des unités électriques au système MKSA

Le développement de l'électromagnétisme au cours du 19^e siècle s'est accompagné de la définition de grandeurs physiques nouvelles : intensité de courant, résistance, tension électrique, champs électrique et magnétique... Pour les mesurer, il a fallu s'entendre sur le choix des unités appropriées, tâche à laquelle s'est attelée la *British Association for the Advancement of Science* dès le milieu du siècle. Elle s'est appuyée sur le constat qu'il est possible d'exprimer toutes les grandeurs électriques et magnétiques en fonction des trois grandeurs fondamentales de la mécanique : longueur, masse et temps. En pratique en effet, la mesure de ces grandeurs utilise des dispositifs mécaniques. La *British Association* adopte donc en 1873 le système CGS (centimètre, gramme, seconde), système qui sera repris ensuite par tous les congrès internationaux d'électricité qui suivront. Ainsi donc, comme son nom ne l'indique pas, le système CGS est un système d'unités électriques créé, à côté du système MKS, par les anglo-saxons.

En réalité il n'y a pas un système CGS, mais plusieurs, selon la loi physique utilisée pour relier grandeurs électriques et mécaniques, et selon le choix de la définition du champ magnétique (le champ électrique est toujours défini comme le rapport d'une force à une charge). Comme loi physique, on peut utiliser la force s'exerçant entre deux charges (loi de Coulomb) $F = k_1 q q' / r^2$ où k_1 est sans dimension et vaut 1, ce qui donne le système CGS électrostatique ; on peut aussi utiliser la force s'exerçant entre deux éléments de conducteurs (loi d'Ampère) $F = k_2 I I' dl dl' / r^2$ où k_2 est sans dimension et vaut 1, ce qui donne le système CGS électromagnétique. Les différentes grandeurs électriques n'ont pas même dimension dans l'un ou l'autre système : par exemple une

résistance électrique est homogène à l'inverse d'une vitesse dans le premier et à une vitesse dans le second (dans tous les cas, on a la relation $k_1/k_2 = c^2$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide). Dans le système de Gauss, qui est une variante du système CGS électrostatique, les champs électrique et magnétique ont même dimension. Selon les grandeurs qu'ils mesurent, les utilisateurs privilégient un système ou un autre.

En 1901, Giovanni Giorgi propose un nouveau système unifié, qui est celui que nous connaissons maintenant, dans lequel $k_1 = 1/4\pi\epsilon_0$ et $k_2 = \mu_0/4\pi$, où ϵ_0 et μ_0 ont chacun une dimension et sont respectivement la permittivité et la perméabilité du vide. On a alors $\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$. Après de nombreuses discussions, ce système unifié est adopté en 1948 par la 9^e CGPM : l'ampère est pris comme unité fondamentale aux côtés du mètre, du kilogramme et de la seconde, ce qui constitue le système MKSA.

L'ampère 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 2×10^{-7} newton par mètre de longueur ». La constante μ_0 se trouve ainsi fixée à $4\pi \times 10^{-7}$ m kg s⁻² A⁻².

La Conférence adopte également le newton comme unité de force (force capable de procurer à une masse de 1 kg une accélération de 1 m/s²). Le joule, alors défini comme l'énergie dégagée pendant une seconde par un courant d'un ampère traversant une résistance d'un ohm, devient également le travail d'une force d'un newton déplaçant son point d'application d'un mètre dans sa direction. Les unités mécaniques et électriques sont enfin unifiées.

Les trois autres unités de base du SI : la candela, le kelvin et la mole

Unité de base du système international depuis ses débuts, la candela (cd) est définie depuis 1979 comme « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian » (W sr⁻¹). Elle est donc définie en termes strictement physiques, comme une grandeur énergétique. Elle est cependant nécessaire pour la photométrie, dont l'objectif est de mesurer la lumière en rendant compte de la sensation visuelle d'un observateur humain. À cet effet, la

Commission internationale de l'éclairage (CIE) utilise une fonction d'efficacité spectrale $V(\lambda)$ qui rend compte de la sensibilité spectrale relative de l'œil humain, et dont la valeur maximale vaut 1 pour $\lambda = 555$ nm, c'est-à-dire pour une fréquence de 540 THz. Les unités dérivées de la candela sont le lumen (lm) homogène à une puissance, unité de flux lumineux telle que 1 lm = 1 cd sr, et le lux (lx) unité d'éclairement telle que 1 lx = 1 cd sr m⁻².

D'abord degré kelvin (°K) en 1954, puis kelvin (K) depuis 1968, le kelvin est l'unité de température, définie comme « la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». Cette définition, complètement indépendante de celles des autres unités du SI, est réalisée en pratique par l'échelle internationale de température : pour chaque domaine de température, des très basses aux très élevées, une loi physique est utilisée qui donne une relation entre une grandeur physique et la température. Cette grandeur peut être la pression d'un gaz, la résistance d'un conducteur, le rayonnement du corps noir, etc.

La dernière unité du système international, d'une grande utilité pour les chimistes, est la mole (mol). « La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Les entités élémentaires doivent être spécifiées ; elles peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules. Avec cette définition, la masse molaire du carbone 12 s'écrit (¹²C) = 12 M_u, où la constante de masse molaire M_u vaut exactement 10⁻³ kg mol⁻¹.

Les atomes pour définir la seconde et le mètre

Lors de la naissance du SI en 1960, la 11^e CGPM redéfinit la seconde non plus à partir du jour solaire moyen, mais comme une fraction de l'année tropique 1900 (l'année tropique est l'intervalle de temps pour que le Soleil, vu de la Terre, retourne à la même position dans le cycle des saisons). Plus précise que la précédente définition, celle-ci se révèle rapidement insuffisante pour les besoins de la métrologie.

Elle est donc remplacée en 1967 par une définition atomique : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Le besoin d'universalité est toujours satisfait

puisque tous les atomes d'un même élément chimique sont identiques entre eux. L'horloge à césium, nouvel étalon de temps et de fréquences, peut être réalisée dans chaque laboratoire, en suivant les recommandations de la *mise en pratique* diffusée par le BIPM.

Le mètre lui aussi est redéfini en 1960 à partir d'un atome, en abandonnant comme étalon le prototype international en platine iridié de 1889. Il s'exprime alors en fonction de la longueur d'onde dans le vide de la transition orangée du krypton 86. Mais cette nouvelle définition, elle aussi, est vite dépassée. La même année en effet, le premier laser voit le jour et dès les années suivantes des lasers variés et de plus en plus performants sont mis au point. Asservis sur des transitions atomiques étroites, les lasers fournissent des références de fréquence dont on peut mesurer très précisément à la fois la longueur d'onde λ par interférométrie et la fréquence f par des dispositifs complexes appelés chaînes de fréquences. Dans les années 1970, de telles mesures sont réalisées sur un laser hélium-néon à 3,39 μm stabilisé sur une raie du méthane. Le produit $\lambda \times f$ est égal à c , la vitesse de la lumière dans le vide. Il donne une mesure de c dont la précision est améliorée d'un facteur 100 par rapport aux mesures antérieures, mais qui est limitée par celle de l'étalon de longueur, la lampe à krypton, c'est-à-dire par le choix de la définition du mètre. C'est pourquoi en 1983, la 17^e CGPM choisit de redéfinir le mètre en attribuant une valeur exacte à la vitesse de la lumière : « Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1 / 299 792 458 seconde ». On a donc $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ et il n'y a plus qu'un seul étalon pour les longueurs et les temps/fréquences : l'horloge à césium.

De toutes les unités du SI, la seconde et le mètre sont celles qui sont définies avec la meilleure exactitude. On sait à ce jour réaliser des horloges à césium qui ont une exactitude relative de quelque 10^{-16} , ce qui correspond à moins d'une seconde d'erreur sur 300 millions d'années ! Mais la recherche continue et d'autres candidats atomiques sont bien placés pour détrôner un jour le césium.

Des atomes, comme par exemple le strontium Sr ou le mercure Hg, et des ions comme Al^+ ou Hg^+ possèdent des raies dans le domaine optique qui pourraient à l'avenir permettre de réaliser des horloges encore 100 fois plus performantes ou mieux.

Le SI bientôt redéfini

Si la redéfinition de la seconde n'est pas pour l'instant à l'ordre du jour, celles du kg, de l'ampère, de la mole et du kelvin, sont maintenant d'actualité. C'est ce que nous discuterons dans un deuxième article dans lequel nous présenterons les motivations de ces redéfinitions et la méthode qui sera suivie.

Pour conclure, la figure 3 montre l'interconnexion actuelle entre les unités de base du système international. Ces unités s'appuient soit sur un artefact matériel (le kg), soit sur l'attribution d'une valeur numérique à une quantité ou un phénomène physique de référence (structure hyperfine du césium, masse molaire du ^{12}C , point triple de l'eau) ou enfin à une constante fondamentale de la physique (c ou μ_0). Comme nous le verrons, c'est cette dernière voie qu'il est prévu de suivre en 2018 pour redéfinir quatre des unités de base du SI.

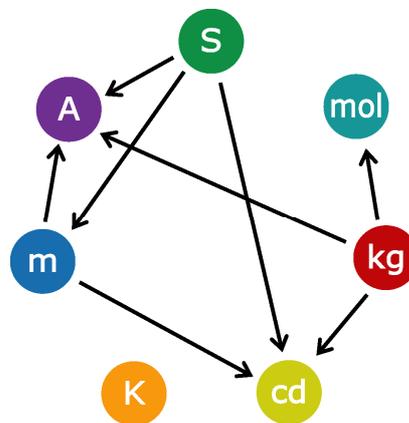


Fig.3. Représentation des interconnexions entre les 7 unités de base du SI actuel.

Pour en savoir plus sur la naissance du mètre et la mesure du méridien terrestre sous la Révolution

- *La méridienne* de Denis Guedj, Robert Laffont (1997) et poche "Points" (2008)
- *Le mètre du monde* de Denis Guedj, Seuil (2000) et poche "Points" (2011)
- *Mesurer le Monde. L'incroyable histoire de l'invention du mètre 1792-1799* de Ken Adler, Flammarion (2005)

À consulter sur la définition des unités et leur histoire : <http://www.bipm.org/fr/about-us/>

