Les unités de base et les étalons

Un regard nouveau

Yves Jeannin

Résumé Par convention internationale, il existe actuellement sept unités de base : le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. Chacune d'entre elles est définie et reliée à un étalon plus ou moins accessible. Les progrès considérables de la physique donnent l'idée de se référer à des constantes universelles majeures, comme la vitesse de la lumière, dont on fixe exactement la valeur sans unité. Dès lors, un nouveau système pourrait être mis sur pied : seule la seconde garderait le statut d'unité de base alors que le mètre, le kilogramme, le volt et le kelvin prendraient le statut d'unités dérivées et n'auraient donc plus besoin d'étalons. La mole pose cependant un problème particulier.

Mots-clés **Unités, étalons, nouvelles définitions, nouvelles unités de base.**

Abstract **Base units and standards: a new approach**
By international agreement, there presently are seven base units: meter, second, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela. Each of them is uniquely defined and given a standard more or less easy to handle. Considerable progresses of modern physics suggest to use major universal constants as fixed exactly without unit, for example the speed of light. Consequently, a new system might be set up: only the second would keep its statute of base unit while the meter, the kilogram, the volt and the kelvin would become derived units and would not need to be referred any longer to a standard. Nevertheless the mole raises a particular problem.

Keywords **Units, standards, new definitions, new base units.**

Toute démarche scientifique ou technique passe par une mesure, les chercheurs et les ingénieurs le savent et le pratiquent. C'est tout aussi vrai dans la vie courante, même si c'est devenu tellement habituel que l'on ne s'en aperçoit même plus : tout achat de fruits et légumes au marché passe par une mesure de poids, toute personne qui se déplace porte attention à la vitesse de son véhicule, à la distance à parcourir et au temps qu'elle va mettre. Que ce soit la couturière qui taille un vêtement, l'électricien qui passe des fils dans une maison neuve, ou le camionneur qui charge son véhicule, tout le monde a besoin de pouvoir mettre une unité derrière la valeur numérique de sa mesure.

Ce n'est pas tout : il faut que l'unité ait la même signification pour tout le monde. Le gallon anglais ne correspond pas au même volume que le gallon américain (4,54 litres contre 3,78) : si un aviateur anglais demande aux États-Unis le plein d'essence en gallons pour rentrer en Angleterre sans prendre garde à cette différence, son avion s'arrêtera au milieu de l'Atlantique ! Il est absolument indispensable de se mettre d'accord sur les unités et leur signification ; cela fait l'objet d'accords internationaux. Les unités sont très nombreuses et certaines d'entre elles en impliquent d'autres. L'unité de vitesse, le kilomètre à l'heure par exemple, demande que l'on précise au préalable le kilomètre et l'heure. Ces deux unités se présentent comme étant des unités primaires indépendantes et l'unité de vitesse est une unité dérivée. L'énergie cinétique correspond au déplacement d'une masse : la masse se présente comme une autre unité indépendante ; par contre, l'unité d'énergie est une unité dérivée. La puissance est une énergie rapportée à l'unité de temps ; c'est une autre unité dérivée. La puissance électrique est le produit de la différence de potentiel V par l'intensité I ; elle peut se comparer à la puissance mécanique, l'unité est la même. Dès lors, il faut définir soit le volt pour avoir l'ampère, soit l'ampère pour avoir le volt. D'où une autre unité indépendante, etc.

Une seule unité de base : la seconde ?

Cette introduction révèle la nécessité de trouver les unités indépendantes auxquelles on se référera, de les définir et de se donner un étalon pour chacune d'elles. Les unités indépendantes que l'on appelle unités de base retenues actuellement par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) sont le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère, la mole, le kelvin et la candela. La définition la plus célèbre d'une unité et le choix correspondant de son étalon sont ceux du mètre : il fut d'abord décrit comme étant la dix millionième partie du quart de la longueur du méridien terrestre. Cette définition relie le mètre à une distance à laquelle tout le monde a accès et qui se présente comme étant invariable dans le temps ; ce sont de gros avantages. Il n'en reste pas moins vrai que ce n'est pas particulièrement commode de s'y référer dans la pratique. C'est pourquoi on en est rapidement arrivé à fabriquer un mètre étalon, objet déposé au Pavillon de Breteuil. Cependant, comment fait celui qui est à Vladivostok pour comparer son mètre à l'étalon du Pavillon de Breteuil ? D'autant plus qu'il est dans un véritable coffre-fort, en atmosphère rigoureusement contrôlée, et que le simple fait de le manipuler risque de l'altérer ! On a donc fabriqué des étalons secondaires, mais sont-ils vraiment identiques entre eux et identiques à l'étalon primaire ? Restent-ils immuables dans le temps ? Pas si sûr, c'est pourquoi on a cherché mieux.

Un phénomène physique peut être reproduit par toute personne dans son laboratoire à n'importe quel moment, à

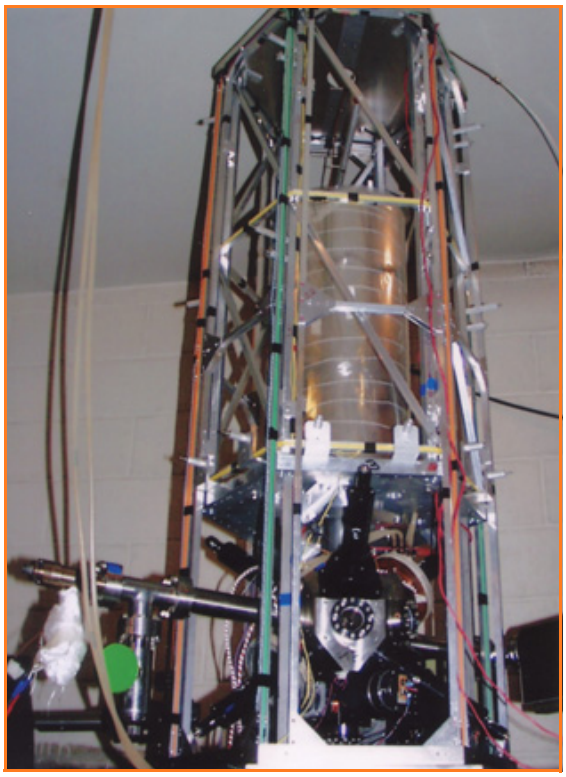

Figure 1 - Fontaine atomique installée au SYRTE-LNE qui sert à la définition de la seconde.
Photo aimablement communiquée par Christophe Salomon du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École Normale Supérieure.

n'importe quel endroit. Les transitions optiques entre deux niveaux d'énergie au sein d'un atome en sont l'exemple parfait. On peut définir la seconde sur cette base : c'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 du césium-133. Cette définition, qui date de 1967, s'avère excellente car la mesure d'une fréquence est extrêmement précise (*figure 1*). À partir de là, on définit le mètre comme étant la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant un intervalle de temps de 1/299 792 458 seconde. Cette définition, datée de 1983, repose cependant sur la mesure de la vitesse de la lumière à laquelle on donne finalement une valeur fixe.

Prenons les choses dans l'autre sens. La réflexion est fondée sur le fait qu'il existe des grandeurs physiques universelles que l'on sait mesurer avec une très grande précision. Cependant, elles sont si universelles qu'il vient à l'idée de les considérer comme de véritables constantes dont la propriété de base est d'être invariables (voir *encadré 1*).

Encadré 1

Quelques valeurs recommandées par CODATA 2002

Constante de Planck	$h = 6{,}6260693(11).10^{-34}$ J.s
Charge de l'électron	$e = 1{,}60217653(14).10^{-19}$ C
Constante de Boltzmann	$k = 1{,}3806505(24).10^{-23}$ J.K^{-1}
Nombre d'Avogadro	$N_A = 6{,}0221415(10).10^{23}$ mol^{-1}

La vitesse de la lumière est déjà considérée comme une constante universelle dont la valeur est fixée exactement :
$c = 299\,792\,458$ m.s^{-1}

Considérons le cas de la vitesse de la lumière. L'invariance de Lorentz en théorie de la relativité nous apprend que cette vitesse est indépendante du référentiel galiléen dans lequel elle est mesurée. Toutes les tentatives faites jusqu'à ce jour pour démontrer le contraire ont échoué. Dès lors, acceptons le statut de constante universelle comme une vérité première et donnons à la vitesse de la lumière une valeur fixe :

$$c = 299\,792\,458 \text{ exactement}$$

La seconde remarque de fond est qu'une constante n'a pas d'unité. On pourrait aller plus loin et se dire que puisque c'est une constante universelle, on peut donner à c la valeur 1. Ce serait pousser le bouchon un peu loin car toutes les grandeurs avec lesquelles nous sommes familiarisés en seraient changées et nous perdrions tous nos repères. Le passage du franc à l'euro nous a montré combien c'est compliqué.

Passons, sur cette base, à l'étape suivante, en utilisant la fameuse formule qui lie longueur d'onde λ et fréquence ν :

$$\lambda = 299\,792\,458/\nu \qquad (1)$$

Il est aisé de voir que la fréquence étant mesurée en seconde^{-1}, la longueur d'onde a pour unité la seconde. C'est inattendu. On s'aperçoit qu'il n'est plus nécessaire de définir l'unité de longueur et donc de choisir un étalon de longueur.

Avec cette nouvelle façon de voir, la vitesse n'a plus d'unité, ce qui est évidemment homogène avec une vitesse de la lumière sans unité. Il faut cependant souligner que ce qui vient d'être dit concerne la métrologie. Dans la vie courante, on continuera bien évidemment d'utiliser le mètre et les unités dérivées usuelles ; on continuera de parler de la vitesse de sa voiture en kilomètre à l'heure.

Abordons l'étape suivante. En mécanique newtonienne, l'énergie cinétique est liée au déplacement d'une masse. Actuellement, la masse se définit par le prototype international appelé kilogramme étalon déposé au Pavillon de Breteuil à Sèvres ; 40 étalons secondaires ont été élaborés en même temps. On n'a pas trouvé mieux depuis 1901. Le problème est que les méthodes de mesure les plus modernes montrent que la masse de ces kilogrammes étalons fluctuent dans le temps et pas tous de la même façon, en moyenne de 80 µg par siècle, sans que l'on sache vraiment pourquoi. Cela devient très gênant pour un étalon auquel on est censé se rapporter. Certes, cette fluctuation ne troublera ni le vendeur ni l'acheteur d'un kilo de carottes. Néanmoins, si l'on fait de la métrologie, on va jusqu'au bout. Il faut donc trouver autre chose que le kilogramme étalon, un objet en platine iridié (*figure 2*).

Les avancées les plus modernes de la physique vont nous donner une approche intéressante. Einstein nous a appris que la masse est équivalente à l'énergie E par l'intermédiaire de la fameuse relation :

$$E = mc^2 \qquad (2)$$

Par ailleurs, en physique quantique, la relation de Planck correspond à une autre façon de regarder l'énergie :

$$E = h\nu \qquad (3)$$

N'oublions pas que nous regardons la vitesse de la lumière c comme une constante universelle sans unité dont la valeur a été fixée. La constante de Planck h joue un rôle central et capital en physique quantique. De la même façon, nous allons la regarder comme une constante universelle, dont la valeur peut de ce fait être fixée exactement et qui n'a

Figure 2 - Le kilogramme étalon en platine iridié déposé au Pavillon de Breteuil qui sert d'étalon depuis 1904.
Photographie reproduite avec l'accord du Bureau international des poids et mesures (BIPM) qui conserve l'intégralité des droits d'auteur, protégés internationalement, sur la forme et le contenu de ce document.

plus besoin d'unité. Dans ces conditions, l'identification des dimensions des relations (2) et (3) :

$$\dim[h\nu] = \dim[mc^2] \quad (4)$$
$$\dim[6{,}6260693.10^{-34}.\nu] = \dim[m(299\ 792\ 458)^2]$$

montre que la masse a la même unité que la fréquence, soit la seconde^{-1}. Il n'est plus nécessaire de maintenir un étalon de masse.

Portons maintenant notre attention sur les unités électriques. Aujourd'hui, l'ampère est défini d'une façon sans doute compliquée mais sans ambiguïté, le volt étant une unité dérivée : l'ampère est l'intensité d'un courant qui, en circulant dans deux fils conducteurs parallèles, de longueur infinie et de section négligeable, placés à un mètre l'un de l'autre dans le vide, crée entre ces deux fils une force de 2.10^{-7} newton par mètre. C'est la définition de 1948. Depuis, la physique quantique a progressé à pas de géant. Josephson a découvert un effet très particulier qui porte son nom et qui lui a valu le prix Nobel en 1973. Deux électrodes métalliques dans l'état supraconducteur sont séparées par une très mince couche d'isolant. Une tension continue V est appliquée entre ces deux électrodes ; il apparaît un courant, celui des paires de Cooper, qui oscille à la fréquence ν et qui se décrit par la relation :

$$V = (h/2e)\nu \quad (5)$$

h/e étant le rapport de la constante de Planck à la charge de l'électron. L'effet Josephson offre une méthode extrêmement précise de mesure de la différence de potentiel. Poursuivant le même type de raisonnement que précédemment, il saute aux yeux que la différence de potentiel se mesure avec la même unité que la fréquence, soit en seconde^{-1}, à condition de considérer la charge de l'électron comme une constante universelle. Pourquoi pas ? L'électron n'est-il pas une particule que l'on trouve dans tous les atomes ? Il n'y a plus de nécessité de définir un étalon particulier pour le volt. À l'heure actuelle, il reste cependant un problème pour sauter le pas : la constante h/2e ne repose pas sur un calcul théorique. Cependant, la reproductibilité de sa valeur, observée en variant la nature chimique des électrodes et la température, atteint 10^{-16}, ce qui est bien plus précis que l'incertitude du rapport h/e liée aux incertitudes sur e et sur h. C'est très encourageant. Considérant que la formule (5) est exacte, la conclusion de ce paragraphe est que le volt peut s'exprimer en seconde^{-1} (voir *encadré 2*).

Ce résultat permet de revenir sur le kilogramme. En effet, la discussion faite plus haut peut paraître ésotérique. Une autre façon de le définir est de passer par une machine dont plusieurs exemplaires ont été construits dans les principaux laboratoires de métrologie du monde : la balance du watt. Son principe est d'opposer une puissance mécanique à une puissance électrique. Une bobine liée à une masse m se déplace à la vitesse v sous l'effet de la pesanteur dans un champ magnétique, ce qui induit une tension V qui est appliquée aux bornes d'une résistance R. La relation correspondant au fonctionnement de la machine s'exprime par :

$$mgv = V^2/R \quad (6)$$

La tension V et la résistance R se mesurent par des effets quantiques, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique ; dans les deux cas, ceci se ramène à une mesure de fréquence. L'accélération de la pesanteur g est mesurée par interférométrie atomique et la vitesse v par interférométrie optique. Il en résulte que la masse s'exprime en seconde^{-1}, à la condition de considérer la constante de Planck comme une constante universelle. Elle intervient en effet dans les expressions décrivant l'effet Josephson et dans l'effet Hall quantique. On retrouve le résultat précédent.

Terminons par la température. Actuellement pour la définir, on utilise le point triple de l'eau : le kelvin est l'unité de température thermodynamique qui est 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau ; cette définition date de 1971. Il est également possible de se passer de cette définition en se fondant sur la relation de Boltzmann qui lie l'énergie et la température : E = kT.

Encadré 2

Les unités électriques

La puissance est par définition une énergie rapportée à l'unité de temps. Les relations $E = mc^2$ ou encore $E = h\nu$ montrent que l'énergie s'exprime en s^{-1}, donc la puissance s'exprime en s^{-2}. La puissance électrique P est le produit VI de la différence de potentiel V et de l'intensité I. P est en s^{-2}, V est en s^{-1}, donc I est en s^{-1}. On s'aperçoit de ce fait que la résistance R = V/I devient un nombre sans unité.
La quantité d'électricité correspond à la relation Q = It. L'unité que nous connaissons est le coulomb. Puisque l'intensité I est en s^{-1} et le temps t est en s, la quantité d'électricité est sans unité. Ceci est en harmonie avec l'idée avancée que l'électron, particule universelle, a une charge qui est une constante universelle dont on pourrait fixer la valeur et qui n'aurait plus besoin d'unité.

Si, une nouvelle fois, on choisit de donner une valeur fixe, sans unité, à la constante de Boltzmann, la température s'exprime elle aussi en seconde^{-1} puisque l'on peut identifier les dimensions :

$$\dim[h\nu] = \dim[kT] \quad (7)$$
$$\dim[6{,}6260693.10^{-34}.\nu] = \dim[1{,}3806505.10^{-23}.T]$$

Avec cette façon de voir, nous ramènerions donc les cinq unités de base actuelles – seconde, mètre, masse, ampère, kelvin – à une seule unité de base : la seconde. Le mètre, le kilogramme, le volt, donc l'ampère, et le kelvin perdraient leur statut d'unité de base.

La mole, un cas à part

La mole est une unité qui concerne les chimistes au premier chef. Elle pose un problème complètement différent. En 1971, on l'a définie comme la quantité de matière d'un système qui contient autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone-12. On remarque que cette définition repose sur la fixation de la masse molaire de l'isotope 12 du carbone à 12 exactement ; par ailleurs, elle implique que le kilogramme ait été préalablement défini. Ce choix, qui date de 1961, entraîne la mesure du nombre d'Avogadro N_A.

À partir de la relation :

$$h = \alpha^2 cm_e/2R_\infty$$

dans laquelle h est la constante de Planck, α la constante de structure fine, c la vitesse de la lumière, m_e la masse absolue de l'électron, R_∞ la constante de Rydberg, on peut aisément déduire :

$$hN_A = [\alpha^2 cm_e/2R_\infty m(^{12}C)].M(^{12}C)$$

où $m(^{12}C)$ est la masse absolue d'un atome de carbone-12 et $M(^{12}C)$ la masse molaire du carbone-12, soit :

$$hN_A = K.M(^{12}C) \quad (8)$$

Le carbone-12 est choisi parce qu'il sert actuellement de point de départ pour la table des masses atomiques. On pourrait utiliser n'importe quel autre isotope.

Fixer h et $M(^{12}C)$ conduit donc à une première valeur calculée pour le nombre d'Avogadro. Une seconde valeur mesurée peut être obtenue directement en comparant le volume macroscopique v d'une sphère de silicium de masse m au volume microscopique de la maille cristallographique cubique d'arête a du silicium de masse molaire M(Si) qui contient huit atomes :

$$v.M(Si)/m = (a^3/8)N_A \quad (9)$$

La concordance entre ces deux méthodes n'est pas parfaite, sans que l'on sache pourquoi. Des efforts considérables sont faits pour résoudre ce problème. Le silicium naturel est constitué de trois isotopes, et donc la composition isotopique intervient dans la valeur de M(Si) : on essaie actuellement de fabriquer une sphère de silicium enrichie à 99,999 % en isotope 28, car la mesure des abondances isotopiques est un maillon faible de cette chaîne de mesures.

Il y a cependant d'autres choix. Dans la relation (8), il y a trois possibilités de fixer deux constantes sans unité et d'en déduire la troisième à partir de K connu par ailleurs : h et N_A donnant $M(^{12}C)$, h et $M(^{12}C)$ donnant N_A, N_A et $M(^{12}C)$ donnant h. Il est clair que fixer la constante de Planck est un choix qui s'impose du fait de son rôle majeur en physique quantique. Reste à se décider entre fixer la valeur du nombre d'Avogadro ou fixer la masse molaire du carbone-12. Il existe une tendance en faveur de N_A fixé car ce choix permet de définir la mole sans faire appel au kilogramme : la mole est la quantité de matière qui correspond à un nombre d'entités égal à N_A. Cependant, on peut faire remarquer que N_A n'est pas une constante universelle au même titre que la vitesse de la lumière ou la constante de Planck. La constante d'Avogadro est en réalité une constante de proportionnalité dont la valeur repose historiquement sur le choix de 1 pour le « poids atomique » de l'hydrogène par Dalton et donc 16 pour le « poids atomique » de l'oxygène ; si l'on avait pris 100 comme Berzelius l'avait proposé en son temps, la valeur de N_A aurait été différente. Par ailleurs, fixer le nombre d'Avogadro entraîne que l'amélioration des mesures rend fluctuante toute l'échelle des masses atomiques relatives des isotopes, et donc des masses molaires des éléments. Évidemment, les fluctuations resteront très faibles, de l'ordre de 10^{-7}, et elles ne toucheront pas le chimiste qui doit peser sur sa balance une certaine quantité de produit chimique dans le but de réaliser la synthèse qui l'intéresse. Disons que c'est un inconfort intellectuel et un changement des habitudes. Inversement, choisir une valeur 12 fixe pour l'isotope carbone-12 rend le nombre d'Avogadro fluctuant avec l'amélioration des mesures, en touchant le sixième chiffre après la virgule et au-delà. Dans ce cas, la mole reste liée au kilogramme ; si donc ce dernier perdait son statut d'unité de base, la mole perdrait également son statut d'unité de base. Le système s'en trouverait simplifié.

Perspectives

L'idée de fixer exactement la vitesse de la lumière pour définir le mètre est déjà entrée en application. Cette méthode pourrait être étendue à d'autres grandes constantes de la physique pour éviter de maintenir autant d'unités de base et donc autant d'étalons correspondants qu'il en existe actuellement. La présentation ci-dessus montre que seule la définition de l'unité seconde s'avère nécessaire ; le mètre, le kilogramme, le volt et le kelvin se présentent comme des unités secondaires à la condition de donner des valeurs fixes à quelques constantes fondamentales. Répétons encore une fois que ceci concerne la métrologie et qu'il n'est pas question de faire disparaître les unités dont on se sert tous les jours. Les réflexions sur cette nouvelle façon de voir vont bon train, le choix des constantes dont on fixera la valeur entraîne de vives discussions car il existe d'autres possibilités que celle décrite ci-dessus. L'avenir dira si cela se traduira par une décision qui ne pourra se prendre qu'au niveau international.

L'Académie des sciences a mis en place un comité qui réfléchit actuellement sur cette nouvelle définition des unités. Il est co-présidé par Jean Kovalevsky et Christian Bordé qui a publié plusieurs mises au point sur le sujet.

Yves Jeannin*
est professeur émérite à l'Université Pierre et Marie Curie.

* 22 rue Henri Heine, 75016 Paris.
Courriel : syjeannin@wanadoo.fr