



Par **Christian J. Bordé**
Correspondant de l'Académie
des sciences, membre de
l'Académie des technologies

La réforme du système d'unités

Allons-nous vers une redéfinition des unités de base à partir des seules constantes fondamentales ?

Introduction : de la Révolution à Max Planck

Le système métrique est né sous la Révolution française avec l'idée-force de mettre en place un système d'unités universel, accessible à tous les peuples de tous les temps. La dimension de la Terre, les propriétés de l'eau apparaissaient alors comme une base universelle mais sont vite dénoncées par Maxwell comme moins universelles que les propriétés des molécules elles-mêmes. L'étape suivante est franchie par Johnstone-Stoney puis par Planck qui montrent qu'on peut aller encore plus loin et fonder un système d'unités uniquement sur un jeu de constantes fondamentales issues de la physique théorique. Il en résulte un long divorce entre les exigences pratiques de la métrologie instrumentale et le rêve des physiciens théoriciens. Un remariage est-il possible ? Il semble que cela le soit aujourd'hui grâce à un ensemble de découvertes récentes et de nouvelles technologies : mesures de longueur par laser, effet Josephson, effet Hall quantique, atomes froids, interférométrie atomique, mesures de fréquences optiques, horloges optiques... Il existe donc à nouveau une tendance forte à rattacher les unités de base à des constantes fondamentales et le débat est ouvert quant à la pertinence, l'opportunité et la formulation de nouvelles définitions.

Dès le début de cette aventure, l'Académie des sciences a joué un rôle moteur essentiel dans l'évolution des idées et la mise en place du système métrique. Ceci lui a valu une reconnaissance indiscutée et indisputée, mais aussi une responsabilité historique vis-à-vis de ce domaine : la présidence de la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) est attribuée au président en exercice de l'Académie des sciences de Paris (Article 4 de la Convention du mètre signée en 1875). Aujourd'hui encore

un groupe de travail de l'Académie réfléchit sur ces questions et a fait des recommandations appréciées par la communauté internationale de métrologie.

État actuel et évolution du système international d'unités, le SI

Le système international SI (11^e CGPM, 1960) comporte sept unités de base qui sont toutes plus ou moins mises en cause par l'évolution en question :

- le mètre a déjà été redéfini à partir de la seconde et de la vitesse de la lumière ;
- le kilogramme, défini aujourd'hui par un artefact de platine iridié, pourrait être redéfini à relativement court terme à partir de la constante de Planck ;
- les unités électriques ont déjà pris leur indépendance vis-à-vis de l'ampère du SI en retenant pour les constantes de Josephson et de von Klitzing des valeurs conventionnelles ;
- le kelvin implique l'utilisation du point triple de l'eau, alors qu'il serait bien plus satisfaisant de fixer la constante de Boltzmann ;
- la candela n'est qu'une unité dérivée de flux énergétique ;
- la mole (ajoutée au SI par la 14^e CGPM en 1971) est définie à partir de la masse de l'atome de carbone par un nombre sans dimension, le nombre d'Avogadro, celui-ci devrait être mieux déterminé pour permettre une alternative à la redéfinition de l'unité de masse, dans laquelle il serait fixé ;
- la seconde pourrait à plus long terme être mieux définie à partir d'une horloge optique, par exemple à hydrogène atomique, ce qui permettrait de la relier à la constante de Rydberg et, peut-être un jour, à la masse de l'électron.

On a donc un ensemble disparate de définitions accumulées au fil des années sans cohérence globale. Le lien direct entre la définition d'une unité de base à partir d'une constante fondamentale, sa mise en œuvre pratique et une découverte scientifique majeure est bien illustré dans le cas du mètre et de sa redéfinition à partir des progrès technologiques des sources laser. C'est l'archétype d'une démarche qui peut servir de modèle à une redéfinition des autres unités.

L'exemple du mètre

Le mètre est l'exemple le plus connu d'une unité de base pour laquelle une nouvelle définition s'est imposée à partir d'une constante fondamentale, la vitesse de la lumière dans le vide c , ceci grâce aux progrès de la physique dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

Les coordonnées d'espace et de temps sont reliées naturellement par les transformations de Lorentz dans le cadre conceptuel de la théorie de la relativité, et la vitesse de la lumière intervient comme facteur de conversion dans ces transformations de symétrie. Elle n'a pu servir à redéfinir l'unité de longueur à partir de l'unité de temps que parce que l'optique moderne a permis de la mesurer avec une incertitude relative inférieure à celle des meilleures mesures de longueurs, mais aussi parce que les mêmes techniques permettent aujourd'hui de réaliser la nouvelle définition du mètre de façon pratique et quotidienne. C'est la technique interférométrique qui permet de passer de la longueur nanométrique qu'est la longueur d'onde liée à une transition atomique, à une longueur macroscopique à l'échelle du mètre.

Cette évolution avait été initiée en 1960 lorsque le mètre avait été redéfini à partir de la radiation fournie par la lampe à Krypton. La découverte des lasers, en 1959, a permis de poursuivre résolument dans cette direction. C'est surtout l'apparition des méthodes de spectroscopie sous-Doppler et, en particulier, la spectroscopie d'absorption saturée, en 1969, qui ont fait des lasers des sources de fréquence optique stable et reproductible. L'autre révolution a été la technique des diodes MIM (métal-isolant-métal) qui a permis de mesurer la fréquence de ces sources lumineuses directement à partir de l'horloge à césium. Partant de là, la vitesse de la lumière a pu être mesurée avec une incertitude suffisamment faible et la CGPM de 1983 en a fixé la valeur, rattachant ainsi le mètre à la seconde. Ceci implique toute une procédure de mise en pratique de la définition à partir de longueurs d'ondes de lasers asservis sur des raies atomiques et moléculaires recommandées.

Pour généraliser cette démarche, essayons de voir de quelles constantes fondamentales nous disposons pour les autres unités.

Les constantes fondamentales dimensionnées et non dimensionnées et leur place dans la physique d'aujourd'hui

Les constantes fondamentales dont il s'agit sont issues des grandes théories de la physique moderne : relativité, mécanique quantique, mécanique statistique, théorie des champs, théorie des cordes... Elles sont donc tributaires de nos modèles et de nos représentations du monde physique.

Quel jeu de constantes fondamentales doit-on finalement choisir ? Celles-ci appartiennent à deux catégories bien distinctes. D'une part, ce qu'on peut appeler des constantes de conversion. Elles servent à relier entre elles des grandeurs jugées *a priori* de nature différente mais dont on a fini par s'apercevoir qu'elles recouvraient la même réalité physique. Un exemple bien connu est l'équivalence entre chaleur et travail qui a conduit à l'équivalent mécanique de la calorie : 4,18 joules par calorie. Ces constantes ont la dimension du rapport des unités qu'elles relient. On pourra fixer la constante correspondante et réduire le nombre d'unités indépendantes. Plusieurs constantes jouent ce rôle sans ambiguïté : c'était le cas de la vitesse de la lumière et c'est aussi le cas de la constante de Planck et de la constante de Boltzmann, comme nous le verrons. Dans d'autres cas, nous aurons un choix à faire entre plusieurs constantes de même nature : ce sera le cas de la charge électrique par exemple. D'autre part, la nature nous impose la valeur de rapports sans dimension ; ce sont, par exemple, les constantes de couplage liées aux interactions fondamentales. La plus connue est la constante de structure fine α qui décrit le couplage de la matière avec le champ électromagnétique. La valeur de ces constantes n'est pas négociable et reste donc indépendante du système d'unités. C'est une contrainte qu'il faudra prendre en compte dans nos choix.

Le kilogramme et la mole : détermination du nombre d'Avogadro par la sphère de silicium

Depuis 1889 (1^{ère} CGPM) l'unité de masse est la masse du prototype international, cylindre de platine iridié appelé \mathfrak{K} et conservé dans un caveau du Pavillon de Breteuil en compagnie de six témoins. À la suite des trois intercomparaisons effectuées en 1889, 1946/53 et 1989/92, tout le monde s'accorde aujourd'hui pour accepter l'idée que la masse du kilogramme étalon, invariable par définition, a en fait dérivé de plusieurs dizaines de microgrammes (c'est-à-dire quelques 10^{-8} en valeur relative). Cette situation où ce sont les électrons et autres particules élémentaires de l'univers qui ont une masse variable dans le temps et non pas le morceau de métal du caveau de Sèvres est embarrassante. Tous les efforts doivent donc être menés pour le remplacer dans son rôle de définition (recommandation de la 21^e CGPM).

Il serait bien plus satisfaisant de partir de la masse d'une particule microscopique (électron ou atome) *a priori* parfaitement reproductible et de remonter à l'échelle macroscopique. Mais si les masses se comparent très bien entre elles à l'échelle macroscopique ou à l'échelle atomique, toute la difficulté réside dans le raccordement de ces deux échelles.

Pour faire ce lien, il faut en effet réaliser un objet dont le nombre d'atomes soit connu et dont la masse puisse être comparée à celle du kilogramme étalon. Ceci revient à déterminer le nombre d'Avogadro N_A qui définit la mole. La mole est une quantité d'objets microscopiques définie comme un nombre conventionnel d'entités identiques. Ce nombre sans dimension a été choisi arbitrairement égal au nombre d'atomes, supposés isolés, au repos et dans leur état fondamental, contenus dans 0,012 kg de carbone 12. C'est donc, à un facteur numérique 0,012 près, le rapport sans dimension de la masse du kilogramme étalon à la masse de l'atome de carbone. La constante d'Avogadro N_A désigne généralement ce même nombre rapporté à une mole et elle est exprimée en mol⁻¹. Ce nombre et cette constante ne sont ni plus ni moins qu'une autre façon d'exprimer la masse de l'atome de carbone ou son douzième, qui est l'unité de masse atomique unifiée m_u .

Il existe un programme international pour la détermination du nombre d'Avogadro à partir de la connaissance d'une sphère de silicium sous tous ses « angles » (carac-

téristiques physiques de dimension, masse, volume de la maille, composition isotopique, état de surface, etc. (voir l'encadré). Ce programme a rencontré et déjà surmonté de nombreuses difficultés et pourrait un jour aboutir à une détermination du nombre d'Avogadro avec une exactitude compatible avec une redéfinition du kilogramme. Celui-ci serait alors défini, en fixant le nombre d'Avogadro, à partir de la masse d'une particule élémentaire, de préférence celle de l'électron.

La notion de masse à partir du temps propre : relativité et mécanique quantique

En fait, la notion de masse ne se réduit pas à celle de quantité de matière et, redéfinir l'unité de masse à partir de la masse d'une particule élémentaire de référence, va certainement dans la direction souhaitée mais ne permet pas de faire passer le rasoir d'Occam et de réduire le nombre d'unités indépendantes. Or, il est possible, comme dans le cas du mètre, de relier l'unité de masse à l'unité de temps. En effet, la théorie de la relativité nous permet d'interpréter la masse m d'un objet comme son énergie interne, donnée par la fameuse relation $E = mc^2$. De plus, Louis de Broglie dans sa célèbre Note de 1923 nous enseigne que cette énergie peut être associée au temps propre τ de l'objet pour donner la phase d'une oscillation interne. Le produit $mc^2\tau$ de ces deux quantités est une action, qui doit donc être rapportée à une action élémentaire, la constante de Planck h , pour donner la phase sans dimension de cette onde $mc^2\tau/h$. En d'autres termes la quantité mc^2/h est une fréquence que nous désignerons par fréquence de de Broglie-Compton (dBC).

Cette fréquence est mesurable directement dans le cas de particules microscopiques telles que les atomes ou les molécules par les techniques modernes d'interférométrie atomique dans lesquelles on fait précisément interférer les ondes de de Broglie entre elles. Cette mesure se fait aujourd'hui avec une incertitude relative inférieure à 10⁻⁸. Partant de là, on peut par simple multiplication par le nombre d'Avogadro N_A remonter à la fréquence de de Broglie-Compton du kilogramme :

$$\nu_{\text{dBC}} = \frac{M_{\text{kg}} c^2}{h} = 1000 N_A \left(\frac{m_u c^2}{h} \right)$$

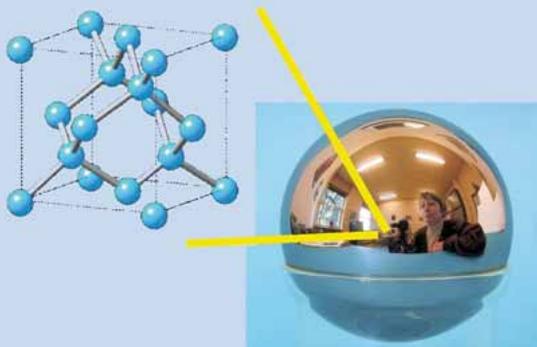
et relier ainsi l'unité de masse à celle de temps. L'unité de masse serait alors définie en fixant cette fréquence, ce qui revient à fixer la constante de Planck. C'est la recommandation qui a été faite par le groupe de travail de l'Académie des sciences au CIPM en 2005.

Nous allons voir qu'il existe une façon plus directe de mesurer cette fréquence qui passe par les avancées spectaculaires de la métrologie électrique quantique que nous allons donc d'abord rappeler.

La constante d'Avogadro

A partir d'un monocristal de silicium purifié par la méthode de la zone flottante, on a fabriqué par polissage plusieurs sphères quasi parfaites ~kg (défauts inférieurs à quelques dizaines de nanomètres), puis on a déterminé grâce à la spectrométrie de masse et aux techniques d'interférométries X et optique de grande précision :

- la taille de la maille (d_{220}) : a ;
- la densité : $\rho = V/m$;
- la masse molaire : M .



La maille de cristal cubique comportant 8 atomes on a ainsi pu déterminer la constante d'Avogadro par la formule : $N_A = 8M/(\rho a^3) = 6,022\,1353\,(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

La métrologie électrique quantique : effet Josephson et effet Hall quantique

Les unités électriques ont connu deux révolutions quantiques à la fin du siècle dernier avec l'effet Josephson, qui permet de réaliser le volt, et l'effet Hall quantique, qui permet de réaliser l'ohm (voir l'encadré sur la métrologie électrique quantique).

Avant le mètre, l'ampère est historiquement le premier exemple d'une unité définie à partir d'une constante fondamentale, la perméabilité magnétique μ_0 du vide (9^e CGPM 1948). La combinaison de ces deux définitions fixe donc l'ensemble des propriétés de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide : vitesse c et impédance $Z_0 = \mu_0 c$. Notons qu'en fixant la constante de Planck, on fixerait aussi une charge électrique, la charge de Planck donnée par :

$$q_p = \sqrt{2h/Z_0}$$

Dans la pratique, les reproductibilités des effets Josephson et Hall quantique (respectivement 10^{-10} et 10^{-9} en valeur relative) sont à un niveau tel que les mesures électriques utilisent aujourd'hui ces effets sans autre raccordement à la définition de l'ampère. Si la constante de Planck était fixée, la tentation serait donc grande pour les électriciens de fixer la charge de l'électron plutôt que la charge de Planck, avec l'arrière-pensée de fixer ainsi les constantes de Josephson et de von Klitzing. Malheureusement les expressions théoriques simples qui relient ces deux constantes à e et h ne sont quant à elles pas encore validées avec une exactitude suffisante (seulement 2×10^{-7} pour K_J et 3×10^{-8} pour R_K en valeur relative) même si on a pu montrer leur universalité à un niveau bien meilleur. Indépendamment des arguments théoriques forts qui sous-tendent ces formules, il est indispensable de s'assurer que des corrections éventuelles sont suffisamment faibles pour que ces deux effets constituent une réalisation fiable des constantes $2e/h$ et h/e^2 .

La métrologie électrique quantique

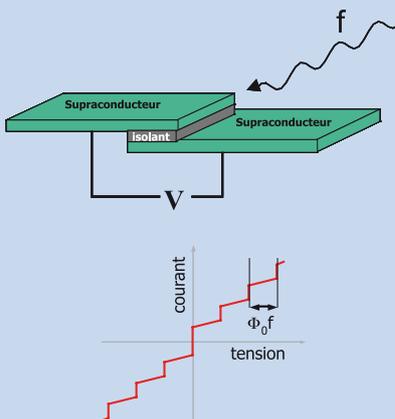
• l'effet Josephson

L'effet Josephson (prix Nobel 1973) utilise la jonction constituée par une très mince couche isolante prise en sandwich entre deux plaques supraconductrices. Lorsque cette jonction est irradiée par une onde électromagnétique de fréquence f , sa caractéristique courant-tension présente des paliers de tension liés à la fréquence f par une simple relation de proportionnalité dans laquelle n est un entier caractérisant chaque palier :

$$V = nK_J^{-1} f$$

La constante de Josephson K_J est donnée avec une excellente approximation par $2e/h$.

La charge $2e$ est celle des paires de Cooper (électrons appariés) qui peuvent franchir la jonction par effet tunnel. L'effet est de nature topologique ($\phi_0 = h/2e$ est un quantum de flux) d'où son caractère universel, indépendamment des détails de réalisation de la jonction et vérifié à 10^{-10} .



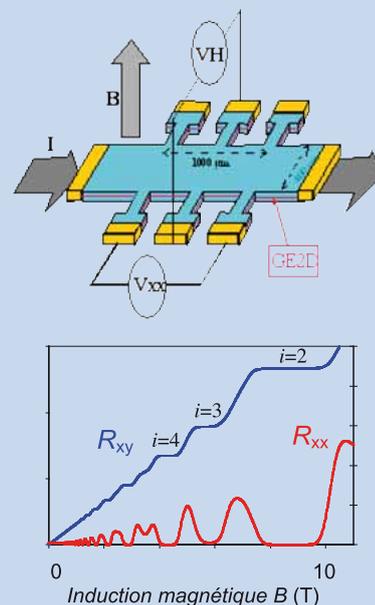
La métrologie électrique quantique

• l'effet Hall quantique

Lorsqu'un gaz bidimensionnel d'électrons dans un matériau semi-conducteur est soumis à un fort champ magnétique, on observe que la résistance transverse (résistance de Hall) de l'échantillon présente des paliers quantifiés par l'entier i et la résistance de von Klitzing (prix Nobel 1985) R_K , alors que la résistance longitudinale s'annule :

$$R_H = \frac{R_K}{i}$$

Ici encore l'effet a une nature topologique universelle et il est protégé par l'anomalie chirale introduite par Schwinger, ce qui laisse supposer que R_K est donné par h/e^2 avec une excellente approximation.



Dans le cas de l'effet Hall quantique, une telle vérification est possible car le rapport de l'impédance du vide Z_0 à h/e^2 expression supposée de R_K n'est autre que le double de la constante de structure fine α sans dimension. L'impédance du vide peut être réalisée au moyen d'un condensateur calculable (Thompson-Lampard) et la comparaison de Z_0/R_K avec la valeur de 2α obtenue par interférométrie atomique se situe actuellement au niveau de quelques 10^{-8} , incertitude susceptible d'être améliorée prochainement au-delà de 10^{-8} . Dans le cas de l'effet Josephson, la limitation provient de la connaissance insuffisante du rapport gyromagnétique du proton. Heureusement deux autres vérifications seront possibles avec le triangle métrologique et la balance du watt. De fait, la métrologie électrique quantique est en train de connaître une troisième révolution avec l'effet tunnel à un électron (Single Electron Tunnelling, SET) permettant de compter les électrons un par un. La loi d'Ohm devient alors une égalité entre fréquences : une différence de potentiel est exprimée comme une fréquence Josephson, un courant comme un nombre d'électrons par seconde et les résistances électriques rapportées à la résistance de von Klitzing sont sans dimension (voir l'encadré).

La fermeture du triangle métrologique permettra de vérifier la cohérence des réalisations quantiques et des théories qui relient K_J et R_K aux constantes fondamentales de

la physique. Elle est réalisée actuellement au niveau de quelques 10^{-7} mais on espère bien pousser cette limite dans l'avenir au niveau de 10^{-8} . La métrologie électrique est donc en pleine évolution. Dans l'avenir, elle occupera une position clé pour tout le reste de la métrologie en particulier grâce au kilogramme « électrique ».

Le kilogramme électrique et la balance du watt

Dans l'hypothèse où les formules donnant K_J et R_K sont considérées comme valides, la combinaison des effets Josephson et Hall quantique permet de produire une puissance électrique proportionnelle à la constante de Planck (voir l'encadré) :

$$UI = (h/2e)^2 / (h/e^2) f_1 f_2 = \frac{h}{4} f_1 f_2$$

Ceci a ouvert la voie à une autre méthode de mesure de la fréquence de de Broglie-Compton du kilogramme, celle du kilogramme « électrique ». Ce kilogramme « électrique » est né avec la balance du watt (voir l'encadré), suggérée par Kibble en 1975, qui, en une étape (version cryogénique du BIPM) ou deux étapes, effectue la comparaison directe entre un watt mécanique, réalisé par le déplacement d'une masse dans le champ gravitationnel de la Terre et le watt électrique, réalisé par la combinaison des effets Josephson et Hall quantique. Cette méthode, mise en œuvre il y a plus de 20 ans aux États-Unis et en Angleterre, a démontré qu'elle était capable d'atteindre un niveau d'incertitude relative compatible avec celui du kilogramme actuel à savoir quelques 10^{-8} . Deux nouvelles réalisations sont en cours de montage et d'évaluation, l'une en Suisse, l'autre encore plus récente en France. D'autres programmes suivront très probablement. Selon toute vraisemblance, cet effort débouchera dans peu d'années sur la possibilité de suivre l'évolution du kilogramme actuel et, dans un deuxième temps, sur la redéfinition de ce kilogramme en fixant sa fréquence de de Broglie-Compton. Malheureusement, aujourd'hui, la fréquence ainsi mesurée diffère de celle donnée par le produit du nombre d'Avogadro par la fréquence de de Broglie-Compton de l'unité de masse atomique déterminée par interférométrie atomique

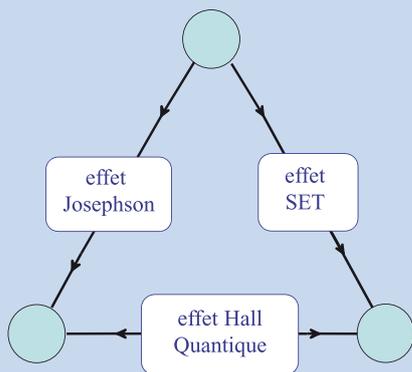
$$1000 \mathcal{N}_A \left(\frac{m_u e^2}{h} \right)$$

par une quantité très supérieure aux incertitudes affichées par les deux méthodes : 1.3×10^{-6} . Les soupçons portent sur la composition isotopique du silicium utilisé pour la détermination du nombre d'Avogadro. Une nouvelle détermination avec du silicium très enrichi est en cours et rien ne pourra bouger tant que l'origine de ce désaccord ne sera pas identifiée.

La métrologie électrique quantique

• le triangle métrologique :

Celui-ci est la réalisation quantique de la loi d'Ohm

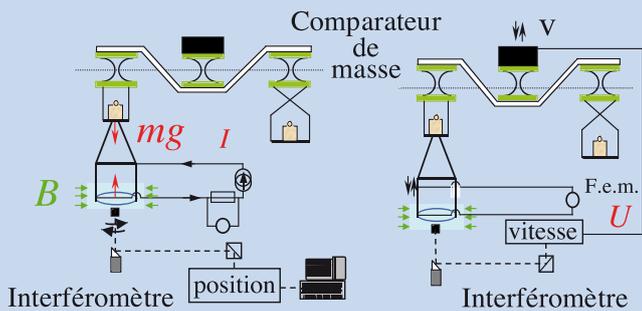


Si les trois effets font effectivement intervenir les mêmes constantes e et h , dans les trois formules

$$U = \frac{h}{2e} f \quad I = ef' \quad \frac{R}{R_K} = \frac{e^2}{h} R$$

on doit vérifier que $U = RI$ conduit bien à une égalité entre fréquences $f = 2(R/R_K)f'$.

La balance du watt



Dans sa version classique la balance du watt fait intervenir deux étapes. Dans la première, le poids du kilogramme dans le champ de pesanteur g est équilibré par la force de Laplace que subit une bobine parcourue par un courant et placée dans un champ magnétique. Le courant I est mesuré par la combinaison des effets Josephson et Hall quantique. Dans un deuxième temps la même bobine est déplacée à vitesse constante v dans le même champ magnétique et la force électromotrice induite U est mesurée grâce à l'effet Josephson. Dans ces conditions, les propriétés de la bobine et du champ sont communes aux deux modes et la formule finale exprimant une égalité entre puissances électrique et mécanique

$$mgv = U I$$

ne fait plus intervenir que des temps et des fréquences pour l'expression de la fréquence de de Broglie-Compton du kilogramme

$$\nu_{\text{dBC}} = \frac{M_{\text{kg}} c^2}{h} = \frac{1}{4} \frac{f_1 f_2 \omega T^2}{\varphi(v/c)}$$

Les fréquences Josephson sont f_1 et f_2 . La vitesse v est mesurée par interférométrie optique et l'accélération de la pesanteur g par un interféromètre atomique (déphasage φ) utilisant des impulsions laser de pulsation ω , séparées par un intervalle temporel T .

La constante de Boltzmann et l'unité de température

La mécanique statistique nous permet de passer des probabilités à l'entropie grâce à une autre constante fondamentale dimensionnée, la constante de Boltzmann k_B . Actuellement, l'échelle des températures est arbitrairement définie par le point triple de l'eau, phénomène certes naturel mais néanmoins très éloigné des constantes fondamentales.

Par analogie avec le cas de la constante de Planck, il paraît naturel de proposer de fixer la constante de Boltzmann k_B . En effet, il y a une analogie profonde entre les deux « S » de la physique, que sont l'action et l'entropie.

Les variables conjuguées de l'énergie correspondantes sont le temps et l'inverse de la température avec les deux constantes fondamentales associées que sont le quantum d'action h et le quantum d'information k_B . Celles-ci interviennent toutes deux en mécanique quantique statistique par leur rapport k_B/h . Plusieurs méthodes de mesure de la constante de Boltzmann k_B , en particulier acoustique (propagation du son dans un gaz) et optique (mesure de largeur Doppler), sont actuellement à l'étude. Elles permettent d'espérer une incertitude suffisamment faible (de l'ordre de 10^{-6}) pour envisager à terme une nouvelle définition du kelvin à partir de la constante de Boltzmann. Sur le principe, cette redéfinition ne semble pas rencontrer d'opposition et pourrait se faire dès que l'exactitude requise sera au rendez-vous.

Et l'unité de temps ? Vers un système totalement unifié ?

La mesure du temps est à la pointe de la métrologie : l'exactitude des horloges atomiques gagne un facteur 10 tous les dix ans. Leur incertitude est meilleure que 10^{-15} aujourd'hui. Grâce à ce très haut niveau d'exactitude, elle tire vers le haut les autres mesures, qui se ramènent le plus souvent à une mesure de temps ou de fréquence. Elle s'enracine dans la physique atomique la plus avancée (atomes froids) et a aussi des applications au quotidien, en particulier pour les systèmes satellitaires globaux de navigation tels que le GPS. Les équipes du SYRTE, à l'Observatoire de Paris, et du Laboratoire Kastler-Brossel ont fait œuvre de pionnier dans l'utilisation des atomes froids pour la réalisation d'horloges sous forme de fontaines atomiques. Parmi les révolutions récentes, citons les horloges optiques qui, associées aux peignes de fréquence fournis par les lasers femtosecondes (J.L. Hall et T. Haensch, prix Nobel 2005), permettront de compter mieux et plus vite et ont de bonnes chances de supplanter les horloges micro-ondes à l'avenir. La compétition reste acharnée entre les atomes neutres (en vol libre ou confinés dans un réseau de lumière pour bénéficier de l'effet Lamb-Dicke) et les ions piégés. Finalement quel sera le rôle du spatial pour comparer les horloges et distribuer le temps ? L'utilisation des horloges sur Terre sera forcément limitée au niveau de 10^{-17} dans l'avenir par la méconnaissance du potentiel de gravitation terrestre. Il faudra alors disposer d'une horloge de référence en orbite. Qui seront les maîtres du temps dans l'avenir ?

Les futures redéfinitions possibles de la seconde constituent un débat ouvert. Y aura-t-il pour la seconde comme pour le mètre une définition universelle assortie d'une mise en pratique et de réalisations secondaires ? Ceci pose, comme pour le mètre, le problème de la variation possible des constantes fondamentales qui affecterait différemment les différentes transitions retenues. Le rubidium a des avantages sur le césium, liés à ses propriétés

collisionnelles et la transition hyperfine du rubidium vient d'ailleurs d'être recommandée par le CCTF (*Comité consultatif pour le temps et les fréquences*) comme représentation secondaire de l'unité de temps. De son côté, l'hydrogène séduit beaucoup de physiciens métrologues qui aimeraient bien fonder la définition de l'unité de temps sur sa transition 1s-2s. Cette transition a fait l'objet d'intercomparaisons spectaculaires (à 10^{-14}) avec la fontaine à césium froid. On pourrait aussi utiliser une combinaison appropriée de fréquences optiques permettant d'isoler au mieux la constante de Rydberg des corrections variées (ce qui se fait aujourd'hui à presque 10^{-12} , grâce aux travaux des groupes de F. Biraben à Paris et de T. Haensch à Garching). Il faudrait donc pousser les calculs du spectre de l'hydrogène le plus loin possible, tout en ayant conscience de l'écart (plusieurs ordres de grandeur) qui sépare pour longtemps la théorie de l'expérience. Enfin, entre la constante de Rydberg et la masse m_e de l'électron, nous retrouvons la constante de structure fine, qui n'est pour l'heure connue qu'à $0,7 \times 10^{-9}$ près (par mesure du moment magnétique anormal de l'électron). On voit que la route est encore longue pour rattacher formellement l'unité de temps à une constante fondamentale, mais il faut prendre conscience du lien implicite qui existe déjà entre la définition de l'unité de temps et ces constantes fondamentales.

Conclusions

Ceci complète notre tour d'horizon rapide sur les unités de base et sur leur relation aux constantes fondamentales. On assiste à l'émergence d'une nouvelle métrologie où la mécanique quantique joue un rôle de plus en plus important. On a clairement une compétition entre deux schémas pour la définition de l'unité de masse : dans le premier de ces schémas, la constante de Planck est fixée et la balance du watt permet la mesure commode des masses ; dans le deuxième, le nombre d'Avogadro est déterminé et fixé et l'unité de masse est définie à partir d'une masse élémentaire telle que celle de l'électron. Dans ce cas, cependant, la réalisation pratique d'une masse macroscopique passe toujours par la réalisation d'un objet macroscopique dont on connaît le nombre d'entités microscopiques. Le premier point de vue est le plus souhaitable sur les plans conceptuel, théorique et même pratique, même si la formulation de la définition de l'unité de masse est plus difficilement accessible pour le grand public. Il faudra de toute façon que les deux voies vers la constante de Planck soient réconciliées.

En ce qui concerne les unités électriques, faut-il fixer la charge du positron e ou bien la charge de Planck q_p ? Le rapport de ces deux charges étant la racine carrée de la constante de structure fine, l'incertitude correspondante se trouvera reportée sur la charge qui n'aura pas été fixée. Des arguments inspirés par les théories récentes des cordes et une formulation plus simple de l'invariance

de jauge poussent vers le premier choix. La prudence vis-à-vis des formules donnant K_J et R_K plaide pour le second choix, qui revient à conserver l'impédance du vide fixée comme c'est le cas actuellement.

Enfin, dans l'hypothèse où l'unité de masse serait redéfinie en fixant la constante de Planck, la mole pourrait être redéfinie indépendamment du kilogramme en fixant le nombre d'Avogadro. Mais ne devrait-on pas plutôt conserver une masse molaire exacte pour le carbone 12 ? Toute la communauté scientifique est actuellement sollicitée pour éclairer ces différents choix avec l'objectif de préparer cette réforme pour la CGPM de 2011 ■

Références

- Métrologie fondamentale, C.R. Physique **5**, 789-931 (2004).
- The fundamental constants of physics, precision measurements and the base units of the SI, Phil. Trans. Roy. Soc. **363**, 2097-2327 (2005).
- CPEM 2006 round table discussion "Proposed changes to the SI", Metrologia **43**, 583-587 (2006).

