

Vers une redéfinition du système international d'unités en 2018

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

Nous avons vu dans un premier article (Cahiers Clairaut n° 154) comment s'est construit le système international d'unités (SI) tel qu'il est aujourd'hui. Ce deuxième article expose les difficultés rencontrées dans la réalisation actuelle des unités et présente le projet de redéfinir le SI en 2018, en attribuant des valeurs numériques fixées à plusieurs constantes.

Introduction

La dernière en date des redéfinitions d'une des sept unités de base du système international d'unités (SI) est celle du mètre en 1983. Elle a consisté à rattacher le mètre à la seconde en donnant une valeur fixée à la vitesse de la lumière dans le vide c . En 2011, la résolution 1 de la 24^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) prévoit la redéfinition prochaine de quatre autres unités, en précisant que :

- le kilogramme restera l'unité de masse mais son *amplitude* sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Planck h ;
- l'ampère restera l'unité de courant électrique mais son *amplitude* sera déterminée en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire e ;
- le kelvin restera l'unité de température mais son *amplitude* sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante de Boltzmann k ;
- la mole restera l'unité de quantité de matière mais son *amplitude* sera déterminée en fixant la valeur numérique de la constante d'Avogadro N_A .

Comme il a été fait pour le mètre, les nouvelles définitions de ces unités donneront donc explicitement une valeur exacte à une constante de la nature. Nous allons voir dans la suite les raisons qui ont conduit à ce projet, qui a été confirmé en 2014 par la 25^e CGPM, et comment sa réalisation se prépare.

Le kilogramme aujourd'hui

La définition du kilogramme n'a pas changé depuis 1889. C'est la masse du prototype international, appelé *IPK*, déposé au pavillon des poids et mesures à Sèvres. Il s'agit du seul étalon matériel encore utilisé aujourd'hui pour définir une unité de base du SI. Il est soigneusement protégé, sous trois cloches

de verre, et possède six copies officielles, déposées également à Sèvres (voir la photo de la figure 2 du précédent article). Chaque pays possède en outre sa copie qui lui sert d'étalon national.

Des inter-comparaisons entre *IPK* et ses copies, ou avec les étalons nationaux, sont parfois organisées. Les dernières ont eu lieu en 1989 et en 2014. Leur résultat met en évidence non seulement une dispersion des résultats obtenus pour les masses des différentes copies, mais aussi un écart systématique d'environ 30 μg entre la moyenne des masses des copies et celle du prototype international. Celui-ci est « au-dessous de la moyenne », même s'il vaut 1 kg par définition ! Ce qui laisse un doute sur sa stabilité en termes de quantité de matière... Cet écart, qui correspond à une dérive de 3×10^{-8} en valeur relative depuis 1889, est bien supérieur à la précision qu'on peut avoir actuellement dans une mesure de masse. Voilà pourquoi, depuis une dizaine d'années de nombreuses voix s'élèvent pour demander une redéfinition du kilogramme.

La réalisation de l'ampère

Du côté des unités électriques, la situation actuelle est également problématique. En pratique, la réalisation de l'ampère se fait non pas en mesurant la force entre deux fils parallèles infinis parcourus par un courant, mais de façon indirecte. La méthode la plus précise passe par la réalisation de l'ohm à l'aide d'un condensateur de Thompson-Lampard et celle du watt à l'aide de la balance du watt.

Le condensateur de Thompson-Lampard est un condensateur formé de plusieurs électrodes cylindriques dont l'une – l'électrode centrale appelée garde – est mobile. Le théorème de Lampard (1956) permet de relier par une formule exacte le

déplacement de l'électrode mobile à la variation ΔC qui en résulte pour la capacité du condensateur. La figure 1 montre la photo du modèle réalisé par le Laboratoire National d'Essais (LNE) : les cinq électrodes fixes sont placées horizontalement et disposées aux sommets d'un pentagone régulier. Le déplacement Δl de la garde est mesuré par interférométrie laser. Ce dispositif permet donc de relier le mètre au farad. Un « pont de quadrature », relié à un oscillateur de pulsation ω , c'est-à-dire à une horloge, permet de raccorder des capacités reliées à cet étalon, à des résistances, par la relation $RC\omega = 1$ et donc de réaliser l'ohm.



Fig.1. Photo du condensateur de Thompson-Lampard du Laboratoire National d'Essais.

La balance du watt quant à elle, fait le lien entre une puissance électrique et une puissance mécanique. Son principe de fonctionnement est schématisé sur la figure 2. Une masse étalon M est placée sur l'un des plateaux de la balance tandis que l'autre plateau est remplacé par une bobine électrique horizontale placée dans un champ magnétique radial dans le plan de la bobine : chaque portion élémentaire de circuit de la bobine est placée dans un champ magnétique d'amplitude B qui lui est perpendiculaire.

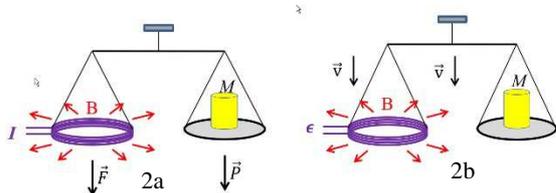


Fig.2. Schéma de fonctionnement d'une balance du watt. (a) dans la phase statique, la bobine est immobile et on mesure l'intensité du courant qui la parcourt lorsque le poids de la masse M est équilibré. (b) dans la phase dynamique, la bobine se déplace à la vitesse \vec{v} et on mesure la tension induite qui apparaît à ses bornes.

L'expérience s'effectue en deux étapes. Dans la phase statique, la bobine est parcourue par un

courant d'intensité I et la force de Laplace subie par la bobine de longueur totale L , qui s'écrit $F = BLI$, est équilibrée par le poids Mg de la masse. On mesure alors l'intensité du courant.

Dans la phase dynamique, la balance se déplace à la vitesse verticale \vec{v} dans le référentiel du laboratoire. La bobine coupe les lignes du champ magnétique et il apparaît à ses bornes une tension induite d'amplitude $E = BLv$ que l'on mesure. Les deux quantités mesurées peuvent être combinées de façon à éliminer les paramètres géométriques de l'expérience. On obtient : $EI = Mgv$, qui est l'égalité entre une puissance électrique et une puissance mécanique. Notons cependant qu'il n'y a ici à aucun moment de puissance électrique dissipée car $I = 0$ dans la phase dynamique. La vitesse v comme l'accélération g de la pesanteur sont mesurées par des méthodes interférométriques. On a donc ici encore une mesure mécanique précise d'une grandeur électrique.

Avec les deux dispositifs ci-dessus, il est possible de raccorder toutes les grandeurs électriques aux grandeurs mécaniques. La réalisation de l'ampère qui en découle est cependant limitée à une exactitude de l'ordre de 10^{-7} alors qu'on dispose de références bien meilleures.

Des références quantiques pour les unités électriques

Pour les mesures électriques de haute précision, ce sont deux effets quantiques macroscopiques apparaissant à basse température qui sont utilisés pour les tensions et les résistances : l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. Les références obtenues ont des performances au niveau de quelques 10^{-9} , bien meilleures que les dispositifs mécaniques.

Une jonction Josephson (prix Nobel de physique 1973) est constituée de deux supraconducteurs séparés par une barrière faite d'un isolant ou d'un métal non supraconducteur. L'effet tunnel permet aux électrons de passer la barrière, dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques nm. L'application d'une tension V entre les deux supraconducteurs s'accompagne d'une différence de phase oscillante entre les fonctions d'onde des électrons de chaque côté de la barrière. C'est un phénomène de nature quantique, qui a pour conséquence l'apparition d'un courant électrique oscillant à travers la jonction. La fréquence de celui-ci est donnée par $f = 2eV/h$. Le facteur 2 dans cette expression provient du fait que dans un supraconducteur les porteurs de charges sont des paires d'électrons (paires de Cooper). La constante Josephson $K_J = 2e/h$, qui relie directe-

ment tensions et fréquences, s'exprime très simplement en fonction de la charge élémentaire e et de la constante de Planck h .

L'effet Hall quantique quant à lui fournit des références de résistances très stables. Il utilise une hétérostructure de semiconducteurs qui permet de confiner à basse température un gaz d'électrons dans un plan : en présence d'un fort champ magnétique normal au plan et d'un courant électrique, il apparaît une tension transverse appelée tension Hall. La résistance associée - rapport de la tension transverse au courant longitudinal - présente, lorsqu'on fait varier le champ magnétique, des paliers de résistivité qui sont des sous-multiples entiers de la constante de von Klitzing (prix Nobel de physique 1985) $R_K = h/e^2$. Ici encore, une grandeur électrique est directement reliée aux deux constantes fondamentales e et h .

L'utilisation des références de tensions et de résistances données par ces deux types de dispositifs a été recommandée par la 18^e CGPM en 1987 ; à cet effet, on a attribué en 1990 des valeurs conventionnelles à la constante Josephson et à la résistance de Hall, notées respectivement K_{J-90} et R_{K-90} . En pratique, c'est à ces références que sont raccordées le condensateur de Thompson-Lampard et la balance du watt décrits plus haut.

Ainsi, si l'on suppose exactes les deux expressions théoriques de K_J et R_K la mesure du produit EI dans la balance du watt se ramène à une expression proportionnelle à $1/K_J^2 R_K = h/4$. On a donc $v = Ah/4$, où A est une constante liée au dispositif, et grâce à la mesure précise de g et v , la balance du watt donne accès au rapport h/M entre la constante de Planck et une masse macroscopique. La constante de Planck s'en déduit avec une incertitude relative qui peut être inférieure à 2×10^{-8} .

La feuille de route et les travaux en cours

Le Comité International des Poids et mesures (CIPM) a publié en 2014 une feuille de route en vue de la révision du SI en 2018. Les comités consultatifs en charge des quatre unités à redéfinir ont également émis des recommandations. Il est en effet nécessaire que les nouvelles définitions n'aient pas d'effet visible pour la plupart des utilisateurs et que l'incertitude sur la réalisation des unités ne soit pas dégradée. Les quatre constantes concernées seront fixées à partir de leur meilleure estimation, déterminée par un ajustement des moindres carrés. Un tel ajustement, prenant en compte toutes les mesures disponibles est mené en général tous les quatre ans par le CODATA (Committee on Data for

Science and Technology, Task Group on Fundamental Constants). Le prochain est prévu pour 2017. D'ici là les laboratoires de métrologie sont invités à redoubler d'efforts pour améliorer la précision sur leurs mesures de k , h , N_A et e . Un bref panorama des méthodes utilisées est présenté dans la suite.

Le kelvin et la constante de Boltzmann

Comme dit dans l'article précédent, le kelvin est défini à partir du point triple de l'eau, mais sa réalisation pratique s'appuie sur l'Échelle Internationale de Température (EIT) où une grandeur physique variant avec la température T fournit une courbe d'étalonnage pour celle-ci.

Les mesures de la constante de Boltzmann s'appuient de même sur des phénomènes physiques dépendant de la température. La loi qui les régit, qui fait apparaître le produit kT doit être bien connue. Cinq méthodes sont actuellement utilisées qui concernent respectivement : la constante diélectrique de l'hélium, l'indice de réfraction de l'hélium, le bruit thermique dans un conducteur, la largeur d'absorption d'un laser dans un gaz et la vitesse du son dans un gaz parfait. Nous nous limiterons ici à présenter la dernière qui donne les résultats les plus précis.

Il s'agit de mesurer la vitesse du son dans un résonateur acoustique rempli de gaz parfait monoatomique. Cette vitesse $u(T,p)$ dépend de la pression et de la température. En extrapolant la mesure de cette vitesse à pression nulle, on déduit $u^2(T,0)$ qui vaut simplement $5kT/3m$ où m est la masse de l'atome considéré. L'expérience est réalisée dans un résonateur quasi-sphérique. La figure 3 montre la photo d'un tel résonateur réalisé pour le LNE-INM (Laboratoire National d'Essais - Institut National de Métrologie).

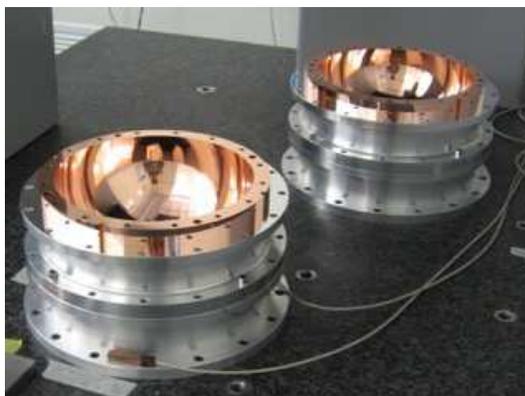


Fig.3. Résonateur quasi-sphérique de l'Institut national de Métrologie utilisé pour mesurer la constante de Boltzmann. On mesure les fréquences des modes de résonance acoustique de cette cavité remplie d'argon et la

vitesse du son u dans l'argon s'en déduit simplement. L'exactitude obtenue sur la constante de Boltzmann déterminée de cette façon est de l'ordre de 10^{-6} , ce qui est environ 5 fois plus précis que la valeur jusqu'ici admise pour cette constante. Après la future définition du kelvin, ce type de dispositif pourra être utilisé comme thermomètre.

La mole et le nombre d'Avogadro

Nous avons vu dans le précédent article que la mole est actuellement définie en attribuant une valeur donnée à la masse molaire du carbone 12 : $M(^{12}\text{C}) = 12 M_u$ où la constante de masse molaire M_u vaut exactement $10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$. À l'avenir, c'est le nombre d'Avogadro qui aura une valeur fixée. La mole sera donc déconnectée de la définition du kilogramme et la masse molaire du carbone 12 ne sera plus exactement de 12 g.



Fig.4. Sphère de silicium 28 dans laquelle se reflète un vieil étalon du kg. C'est une telle sphère qui permet de réaliser une mesure précise du nombre d'Avogadro. Son écart à la forme sphérique parfaite correspondrait à l'échelle du globe terrestre à une variation d'altitude d'environ 2 m.

Pour préparer cette redéfinition, il faut d'ici là déterminer le nombre d'Avogadro en connectant des mesures d'une même grandeur – la masse par exemple – d'une part au niveau microscopique et d'autre part au niveau macroscopique. La méthode actuelle la plus précise revient à compter le nombre d'atomes dans une sphère de silicium dont la composition et la forme sont très bien connues. La photo d'une telle sphère est représentée sur la figure 4.

Donnons ici les étapes essentielles de cette mesure, réalisée par la collaboration internationale IAC (International Avogadro Constant) :

- séparation isotopique du silicium 28 des deux autres isotopes 29 et 30 par voie chimique et centrifugation, aboutissant à la fusion d'un lingot de silicium 28 presque pur ;

- analyse d'un échantillon de ce lingot par interférométrie X pour mesurer la distance entre les plans atomiques et donc le volume de la maille cristalline ;

- à partir du même lingot, usinage et polissage d'une sphère presque parfaite (figure 4) et mesure de son diamètre par interférométrie optique ;

- pesée de la sphère avec une balance de précision.

Comme on sait par ailleurs mesurer précisément le rapport des masses molaires du ^{12}C et du ^{28}Si , on connaît la masse molaire du silicium présent dans le lingot et donc, à partir de la masse du lingot, le nombre de moles correspondant. Enfin, le volume de la sphère et le volume d'une maille cristalline élémentaire ayant été déterminés, on connaît le nombre d'atomes de la sphère. Le nombre d'Avogadro est simplement donné par le rapport de ces deux nombres. On l'obtient ainsi avec une incertitude relative de 3×10^{-8} .

Relier une masse microscopique à la constante de Planck

Notre équipe au laboratoire Kastler Brossel à Paris est spécialisée dans la mesure des constantes fondamentales par spectroscopie laser. Nous avons deux expériences en cours qui ont pour premier objectif de tester les lois fondamentales de la physique quantique, mais qui permettent aussi de tester la cohérence des mesures de constantes fondamentales avant la redéfinition du SI. C'est pourquoi nous en parlons ici brièvement.

L'une consiste à mesurer l'effet de recul d'un atome quand il absorbe un photon de vecteur d'onde \vec{k} ($k = 2\pi/\lambda$). L'atome considéré est un atome de rubidium ultra-froid et donc quasi-immobile. Lorsqu'il change d'état interne en absorbant un photon, il y a conservation de l'impulsion et il acquiert une vitesse de recul \vec{v}_r telle que :

$$m \vec{v}_r = \hbar \vec{k} .$$

On mesure cette vitesse de recul par

spectroscopie, en observant le décalage Doppler qui en résulte sur une raie atomique. Le vecteur d'onde du laser incident étant connu, on peut donc en déduire le rapport h/m de la constante de Planck à la masse de l'atome considéré.

Puisque la balance du watt donne accès au rapport h/M où M est une masse macroscopique, la comparaison de celle-ci avec une expérience de recul permet de comparer une masse macroscopique à une masse microscopique, de la même manière que la sphère de silicium. On peut aussi à l'inverse combiner sphère de silicium et effet de recul pour tester la balance du watt, ou utiliser les deux pour déterminer la constante de Planck (voir encadré).

Une nouvelle cohérence

Pour conclure cet article, revenons sur les motivations et les conséquences de la redéfinition de quatre des unités de base du SI en 2018. La redéfinition du mètre en 1983, en fixant la vitesse de la lumière dans le vide, nous a familiarisés avec l'idée que fixer la valeur d'une constante fondamentale peut être une façon pertinente et pérenne de redéfinir une unité. Même si le lien entre le kilogramme et la constante de Planck h n'est pas évident à première vue, on peut cependant remarquer que, comme mc^2 ou kT , le produit hf – où la fréquence f est la grandeur physique qu'on sait le mieux mesurer à l'heure actuelle – représente une énergie élémentaire. Il n'est donc pas si étonnant que, comme on l'a fait pour c , on envisage maintenant de fixer les valeurs de k et h . De la même façon, c'est en fixant la valeur d'une quantité élémentaire et universelle, la charge e , que l'ampère peut maintenant être redéfini.

Avec l'attribution de valeurs fixées à e et h , les constantes K_J et R_K auront elles aussi à l'avenir des valeurs fixées et les dispositifs basés sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique deviendront de vrais étalons électriques liés au SI, alors qu'ils ne donnent actuellement que des références de tensions et de résistances. A contrario, les constantes ϵ_0 et μ_0 , permittivité et perméabilité du vide, n'auront plus de valeurs fixées, même si l'on aura bien sûr toujours la relation $\epsilon_0\mu_0c^2 = 1$.

La redéfinition du SI est rendue possible grâce aux progrès de la métrologie ces dernières années dans tous les domaines de la physique, et au développement d'appareils de mesure dont certains ont été décrits brièvement ici. Nous avons vu que selon les cas, une unité peut être définie indépendamment des autres (c'est le cas du kelvin) ou bien liée de façon intrinsèque à d'autres et que les liens entre unités peuvent changer selon les définitions choisies. Les nouvelles interconnexions entre les unités de base après la redéfinition du SI sont représentées sur la figure 5 ; on peut constater qu'elles sont différentes de celles de la figure 3 de l'article précédent, qui concernaient le SI actuel.

Nous avons dans notre premier article souligné le souci d'universalité des unités de mesure, prôné par les révolutionnaires français et qui a accompagné la naissance du système métrique en 1795. Cette idée est plus que jamais présente dans la redéfinition du SI, car quoi de plus universel que les constantes de la physique ?

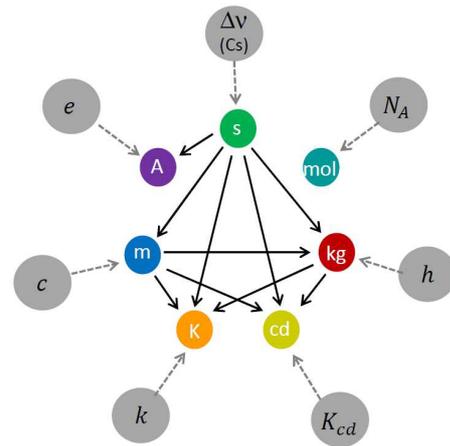


Fig.5 Interconnexions entre les unités de base du SI après la redéfinition prévue en 2018. Les constantes fixées sont représentées à côté de chaque unité.

Encadré : La spectroscopie laser, une clé pour les constantes fondamentales

L'autre expérience réalisée dans notre équipe consiste à mesurer très précisément des fréquences de transitions de l'atome d'hydrogène. De ces fréquences on déduit entre autres la constante de Rydberg, qui donne l'échelle d'énergie des niveaux de cet atome, et qui a pour expression $R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2h$, où m_e est la masse de l'électron et α la constante de structure fine. Cette dernière, sans dimension, vaut environ 1/137 et s'exprime, elle aussi, en termes de constantes fondamentales : $\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c$. C'est elle qui décrit l'intensité de l'interaction électromagnétique.

La constante de Rydberg est actuellement connue avec une incertitude relative de l'ordre de 5×10^{-12} . De plus, notre expérience de recul sur les atomes de rubidium permet de déduire α avec une précision de quelques 10^{-10} à partir de R_∞ et de h/m_{Rb} en remarquant que $\alpha^2 = \frac{2R_\infty}{c} \times \frac{m_{Rb}}{m_e} \times \frac{h}{m_{Rb}}$ (le rapport de masse entre l'électron et l'atome de rubidium est connu avec une incertitude de l'ordre de 10^{-10}). »

Les deux constantes R_∞ et α jouent alors un rôle clé pour tester la cohérence des mesures décrites dans cet article. En les utilisant toutes deux, on peut relier h à N_A et par exemple déduire la constante de Planck de la mesure réalisée sur la sphère de silicium, car la masse relative molaire $A_r(e)$ de l'électron est bien connue et qu'on a : $h = c A_r(e) M_u \alpha^2 / 2 N_A R_\infty$. La précision obtenue par cette méthode sur h est comparable à celle donnée par la balance du watt. Enfin, la constante de structure fine, associée à la constante de Planck, donne une mesure de la charge de l'électron. En effet, de l'expression de α donnée en haut de cet encadré on déduit que :

$e = \sqrt{2\alpha h / \mu_0 c}$, expression dans laquelle la constante μ_0 est actuellement fixée, comme c .