

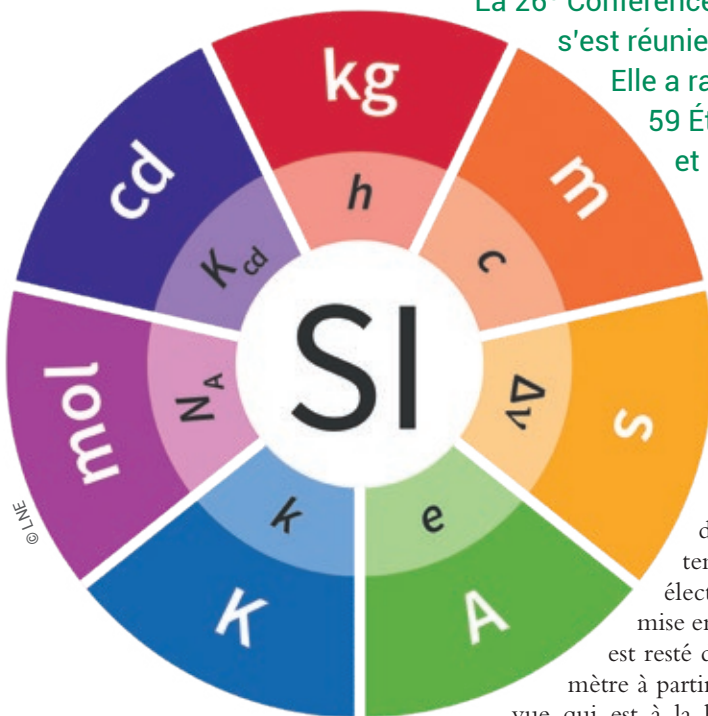
Dossier

Le nouveau Système international d'unités

Le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin redéfinis

La 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM) s'est réunie à Versailles du 13 au 16 novembre 2018.

Elle a rassemblé les représentants de la plupart des 59 États membres du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et des 43 États associés.



Lors de sa séance publique solennelle du 16 novembre, la conférence a entériné la proposition faite par le Comité international des poids et mesures (CIPM) de redéfinir quatre des unités de base du système international (SI) : le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin [1]. Les nouvelles définitions de ces unités attribuent maintenant des valeurs numériques fixées à quatre constantes de la physique : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Le nouveau SI est entré en application le 20 mai 2019.

Il n'est pas besoin de rappeler l'intérêt de s'accorder sur la définition des unités afin d'avoir des références communes pour les mesures de temps, de masse, de longueur, de température, d'énergie, de tension électrique... La France depuis la Révolution a joué un tel rôle dans la mise en place d'un système international d'unités, le SI, que son acronyme est resté dans l'ordre de la langue française. Préfiguré par la redéfinition du mètre à partir de la seconde il y a trente-cinq ans, le renversement de point de vue qui est à la base de la redéfinition des quatre unités est radical. Les quatre constantes qu'il était un défi de mesurer le plus précisément possible ne le seront plus, et les expériences mises en œuvre pour leur détermination deviennent les outils de la réalisation des unités^(a).

Ce dossier s'ouvre par une présentation générale, dans laquelle Lucile Julien rappelle l'histoire de la mise en place du SI et la logique ayant porté la redéfinition de quatre de ses unités. En complément, François Nez présente le fonctionnement du Comité (international) de données pour la science et la technologie (CODATA). Suivent quatre articles décrivant des expériences françaises ayant contribué à la redéfinition des unités. Matthieu Thomas *et al.* illustrent le renversement de point de vue entre la mesure de la constante de Planck et la réalisation du kilogramme par une mesure de masse. Pierre Cladé et Saïda Guellati montrent comment l'effet de recul atomique permet une mesure ultra-précise de masse microscopique, puis comment sont articulées les mesures des masses microscopique et macroscopique sur des sphères de silicium. Sophie Djordjevic *et al.* expliquent comment la précision apportée par l'effet Josephson et l'effet Hall quantique a permis de réaliser de façon indépendante des étalons électriques qui sont maintenant intégrés dans le nouveau SI. Enfin, Laurent Pitre et Mohamed Sadli décrivent la mesure la plus précise de la constante de Boltzmann, effectuée par une méthode acoustique qui s'impose maintenant pour la mise en pratique de la nouvelle définition du kelvin.

Référence

1 • www.youtube.com/watch?v=gimwAPQbH0w&index=4&list=PL-vj-3_a7wTDeKEupZSX7Tw42yReNgJLI

(a) Pour les unités, le sens donné au mot « réalisation » diffère de l'usage courant. Par exemple, la réalisation du kilogramme est la façon concrète dont on traduit sa définition par un dispositif expérimental permettant d'effectuer une mesure de masse.

Le Système international d'unités redéfini

Lucile Julien (lucile.julien@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Le Système international d'unités (SI) est fondé sur sept unités de base qui sont le mètre (m), le kilogramme (kg), la seconde (s), l'ampère (A), le kelvin (K), la mole (mol) et la candela (cd), respectivement unités de longueur, de masse, de temps, de courant électrique, de température, de quantité de matière et d'intensité lumineuse. Toutes les autres unités du SI sont des unités dérivées, qui se déduisent de ces unités de base.

Le choix et la définition des unités de base sont fixés par convention entre les États membres du BIPM. Ils font l'objet d'un accord écrit, qui s'accompagne ensuite de ce qu'on appelle des mises en pratique. La mise en pratique d'une définition est une série d'instructions, en général discutée par un comité consultatif avant d'être publiée par le BIPM, qui permet la réalisation concrète de cette définition, avec les meilleures qualités métrologiques possibles. Pour la dissémination des unités et l'étalement des appareils de mesure, on réalise des étalons : ce sont des artefacts matériels ou des dispositifs expérimentaux qui matérialisent l'unité d'une grandeur physique, avec une valeur connue et une exactitude qui peut être plus ou moins grande.

À l'occasion de la redéfinition de quatre d'entre elles, entrée en vigueur le 20 mai 2019, les sept unités de base du SI ont vu leur définition reformulée, comme nous allons le voir. Dans l'histoire des unités de mesures, ce n'est pas la première fois qu'une définition est modifiée, mais la refonte actuelle du SI est d'une ampleur particulièrement exceptionnelle. Nous donnons ci-dessous des exemples de définitions successives de certaines unités, ce qui est l'occasion de retracer brièvement l'histoire du SI et ses origines.

Du système métrique au système MKSA

Le système métrique décimal est né en France pendant la Révolution. À l'occasion des États généraux de 1789, le roi Louis XVI demande que des cahiers de doléances, ouverts dans toute la France, recueillent les vœux et suggestions de tous les habitants du royaume. Partout dans ces cahiers, on demande qu'il n'y ait plus « deux poids, deux mesures » : cette expression est restée dans le langage courant. En effet, non seulement chaque région possédait alors son propre système de mesures, différent pour chaque type de métier, mais la même unité pouvait avoir différentes variantes (toise de Charlemagne, toise du Châtelet, toise du Pérou...), ce qui était facilement source de tromperies dans les échanges commerciaux. En outre, la variété des subdivisions des différentes unités (par 20, par 12, par 8, par 6, par 3...) rendait les calculs extrêmement difficiles et inaccessibles à beaucoup de personnes.

Le 9 mars 1790, Talleyrand propose à l'Assemblée nationale un « Mémoire sur la nécessité de rendre uniformes dans tout le Royaume, toutes les mesures d'étendue et de pesanteur ». Il faut entendre par là les mesures de longueur et de poids, ce dernier n'étant alors pas distingué de la masse dans le langage commun. L'idée est de définir de nouvelles unités qui soient universelles, c'est-à-dire qui ne tiennent « à aucun climat, ni à aucune nation particulière ». Pour l'unité de longueur, le choix se porte sur le mètre, défini comme la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre. L'unité de masse en est déduite, comme celle d'un décimètre cube d'eau distillée. La loi du 18 germinal de l'an III (7 avril 1795) institue le système métrique décimal.

Delambre et Méchain, chargés de mesurer l'arc de méridien terrestre de Dunkerque à Barcelone, quittent Paris en mai 1792 et n'y sont de retour tous deux qu'en novembre 1798, après de nombreuses péripéties, dues à la guerre et à la succession des changements politiques. Grâce à leurs travaux, le quart du méridien est évalué ; un mètre étalon et un kilogramme étalon prototypes sont réalisés en platine et déposés aux Archives de la République en 1799. Ce n'est cependant que le 1^{er} janvier 1840 que l'usage du système métrique est rendu obligatoire en France. L'idéal d'universalité porté par le système métrique est présent dans sa devise « À tous les temps, à tous les peuples » (fig. 1).

En 1875 est signée la Convention du mètre, traité international qui crée le BIPM et réunit alors 17 États membres (59 actuellement). La première CGPM se réunit en 1889 : à cette occasion, deux nouveaux prototypes internationaux du mètre et du kilogramme sont réalisés en platine iridié (90% de platine, 10% d'iridium) et déposés dans les locaux du BIPM à Sèvres. Avec la seconde, définie par les astronomes comme « la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen », ils sont la base du système d'unités mécaniques MKS.

Pendant le même temps, au XIX^e siècle, avec le développement de l'électricité et la nécessité de mesurer les grandeurs électriques et magnétiques, un système d'unités électriques s'est développé sous l'égide de la British Association for the Advancement of Science. Il s'appuie sur la possibilité de mesurer les grandeurs électriques et magnétiques à partir de leurs effets mécaniques et donc d'exprimer toutes ces grandeurs en fonction des unités de longueur, de masse et de temps. Le système électrique CGS (centimètre,

gramme, seconde) est adopté en 1873 par la British Association, puis utilisé dans les congrès internationaux d'électricité. En réalité il y a plusieurs systèmes CGS, selon la loi physique utilisée pour relier grandeurs électriques et mécaniques (loi de Coulomb ou loi d'Ampère) et selon le choix de la valeur des coefficients de proportionnalité intervenant dans les lois physiques définissant les grandeurs.

Après de longues discussions, l'unification entre unités mécaniques et unités électriques dans un système cohérent n'est réalisée qu'en 1948, lors de la 9^e CGPM. L'ampère est pris comme unité de base aux côtés du mètre, du kilogramme et de la seconde, ce

qui constitue le système d'unités MKSA. La conférence adopte le newton comme unité de force : c'est la force capable de procurer à une masse de 1 kg une accélération de 1 m s^{-2} . 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 $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur » (voir la figure, p. 25). Cette définition, restée en vigueur jusqu'au 20 mai 2019, donne à la perméabilité du vide μ_0 la valeur exacte de $4\pi \cdot 10^{-7}$.



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

Le Système international d'unités

Le Système international (SI) naît en 1960 à la 11^e CGPM, avec six unités de base (le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin et la candela). La septième unité de base est la mole qui n'est ajoutée qu'en 1971. Elle est définie comme « la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12 ». Elle est donc reliée à l'unité de masse.

Le kelvin, unité de température thermodynamique, est, quant à lui, introduit dès 1954, même si la formulation de sa définition a été revue depuis. C'est « la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ». On peut remarquer que cette définition ne fait appel à aucune autre grandeur physique et est donc déconnectée de celle des autres unités de base.

Ce n'est pas le cas de la candela (cd), qui fait appel à une puissance, tout en prenant en compte la sensibilité de l'œil humain à la lumière. Depuis 1979, la candela est par définition « l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian ». Exprimée en termes strictement physiques, elle s'appuie sur la constante $K_{cd} = 683 \text{ cd sr W}^{-1}$, mais elle sert pour la photométrie dont l'objectif est de mesurer la lumière en rendant compte de la sensation visuelle d'un observateur humain. Elle utilise donc une fonction d'efficacité spectrale $V(\lambda)$, dont la valeur maximale est 1 pour la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ (soit à 540 THz , dans le vert du spectre visible) où la sensibilité de l'œil est maximale. Cette fonction est définie par la Commission internationale de l'éclairage. L'unité de flux lumineux, le lumen, et celle d'éclairement lumineux, le lux, sont des unités dérivées de la candela ($1 \text{ lumen} = 1 \text{ cd sr}$; $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen m}^{-2}$).

Les atomes pour définir la seconde et le mètre

En 1960, la 11^e CGPM décide d'abandonner la définition de la seconde à partir de la durée du jour solaire moyen ; en effet la rotation de la Terre présente des irrégularités, nettement visibles avec les oscillateurs à quartz de plus en plus stables

dont on dispose alors. Elle choisit une nouvelle définition proposée par l'Union astronomique internationale : « la fraction $1/31\,556\,925,947$ de l'année tropique 1900 » (l'année tropique est définie comme l'intervalle de temps, sur Terre, pour que le Soleil retourne à la même position apparente dans le cycle des saisons). Mais cette définition, peu commode, sera rapidement abandonnée.

En 1967, la 13^e CGPM constate que cette définition de la seconde « ne suffit pas aux besoins actuels de la métrologie », et que « le moment est venu de remplacer la définition actuellement en vigueur de l'unité de temps du Système international d'unités par une définition atomique » ; elle décide donc de redéfinir la seconde (s) comme « la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». La fréquence (dans le domaine des micro-ondes) de la transition hyperfine de l'atome de césium prend donc une valeur fixée. Cette définition est toujours en vigueur et permet actuellement de réaliser la seconde avec un niveau d'exactitude d'environ 2×10^{-16} avec des fontaines à atomes froids. Remarquons que l'idéal d'universalité recherché par les révolutionnaires français est bien présent dans cette définition. En effet, tous les atomes du même isotope d'un même élément chimique ont les mêmes propriétés, qui sont universelles.

Avant la seconde, le mètre a été redéfini en 1960 non plus comme la longueur du prototype international de 1889, mais à partir d'une longueur d'onde atomique. La 11^e CGPM a en effet décidé que le mètre était « la longueur égale à $1\,650\,763,73$ longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86 ». La longueur d'onde de la raie orangée du krypton 86 se trouve ainsi fixée. En pratique, elle est fournie par une lampe à décharge et cette raie possède une certaine largeur.

Il se trouve que l'année 1960 est aussi celle de fonctionnement du premier laser et que les lasers, qui vont se développer rapidement dans les années qui suivent, ont une largeur spectrale bien plus étroite que celle des lampes. Les lasers vont devenir des références de longueurs d'onde et de fréquences, qu'on saura mesurer de plus en plus précisément. Pour une radiation

donnée se propageant dans le vide, le produit de la longueur d'onde par la fréquence donne la vitesse de la lumière c . Des déterminations de cette vitesse vont ainsi être réalisées, mais dont l'incertitude de quelques 10^{-9} est limitée non par les dispositifs de mesure (interférométrie et chaînes de fréquences) mais par l'étalon de longueur lui-même, la lampe à krypton. Une fois encore, quand l'étalon est le facteur limitant d'une mesure, c'est qu'il est temps d'en changer.

En 1983, la 17^e CGPM attribue une valeur exacte à la vitesse de la lumière c , en redéfinissant le mètre comme : « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ seconde ». Le mètre se trouve ainsi raccordé à la seconde et il n'y a plus qu'un seul étalon, l'horloge à césium, pour les longueurs et les temps (ou fréquences). La réalisation pratique du mètre peut être obtenue avec un laser et une horloge : on utilise par exemple des lasers continus de fréquence connue pour mesurer des petites distances par interférométrie ; ou bien des lasers en impulsions pour déduire une distance macroscopique du temps mis par la lumière pour la parcourir.

Les unités qui ne changent pas

Parmi les sept unités de base du système international, la seconde, le mètre et la candela ne sont pas modifiés en 2019, même si leurs définitions sont reformulées. Comme nous l'avons vu plus haut, elles font intervenir des valeurs numériques fixées pour :

- la fréquence de la transition hyperfine du césium 133, $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$, qui intervient dans la définition de la seconde ;
- la vitesse de la lumière dans le vide, $c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$, qui intervient dans la définition du mètre ;
- la constante $K_{cd} = 683 \text{ lumen W}^{-1}$, qui intervient dans la définition de la candela.

Cependant, leurs définitions sont réécrites avec une nouvelle formulation dite « à constante explicite ». Par exemple, la définition du mètre est maintenant la suivante : « Le mètre, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à $299\,792\,458$ lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde

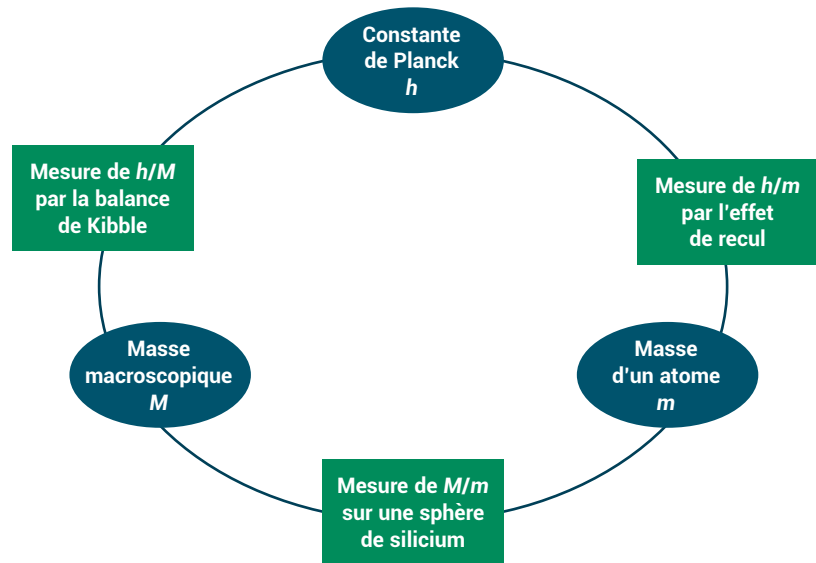
étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.» Les définitions de chacune des sept unités de base sont maintenant formulées selon ce même modèle.

Les unités qu'il fallait changer

Ces dernières années, le prototype international du kilogramme (IPK, noté avec la lettre \mathcal{K}) était le seul artefact matériel encore utilisé pour définir une unité de base du SI. Conservé au BIPM depuis 1889, il a été depuis cette date comparé trois fois à ses six copies témoins officielles. La dernière comparaison, réalisée en 2014, a confirmé une différence de $35 \mu\text{g}$ (soit $3,5 \cdot 10^{-8}$ en valeur relative) entre IPK et la moyenne de ces copies, ce qui laisse penser que la quantité de matière qu'il contient a sans doute changé depuis sa fabrication, même si sa masse restait 1 kg par définition. La référence à un prototype international unique pour les masses a de nombreux inconvénients, explicités dans l'article de M. Thomas *et al.* (p. 18), parmi lesquels le risque de détérioration ou de destruction accidentelle. De l'avis de tous, il était temps de changer la définition du kilogramme. Une possibilité aurait été de rattacher celui-ci à une masse microscopique, le carbone 12 par exemple, en fixant la valeur de la constante d'Avogadro N_A . Un autre choix a été fait, qui est de fixer la valeur de la constante de Planck h .

Cependant, à l'occasion de la refonte du SI, et comme il est maintenant possible de mieux relier les masses macroscopiques aux masses microscopiques, il a été décidé de redéfinir également la mole en fixant la valeur de N_A .

La définition de l'ampère nécessitait elle aussi d'être revisitée. La réalisation pratique de cette unité ne pouvant se faire directement avec les « deux fils infinis » intervenant dans sa définition, on utilisait des dispositifs mécaniques pour réaliser d'une part le volt et d'autre part l'ohm, et à partir d'eux l'ampère. De tels dispositifs ne permettent pas d'obtenir une exactitude meilleure que quelques 10^{-7} . C'est pourquoi, depuis 1990, ce sont deux phénomènes quantiques macroscopiques qui servaient en pratique de références dans les laboratoires : l'effet Josephson pour les tensions et l'effet Hall quantique pour les résistances (voir l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25). Une jonction



2. Deux types d'expériences donnent accès au rapport entre h et une masse : la balance de Kibble pour les masses macroscopiques, en passant par les unités électriques, et l'effet de recul d'un atome pour les masses microscopiques. Le comptage du nombre d'atomes dans une sphère de silicium permet de faire le lien entre une masse macroscopique et la masse d'un atome.

Josephson est un convertisseur fréquence-tension. La constante de proportionnalité est la constante de Josephson donnée par $K_J = 2e/h$, où e est la charge électrique élémentaire. L'effet Hall quantique, quant à lui, fournit des paliers de résistance donnés par les sous-multiples de $R_K = h/e^2$. La stabilité de ces deux types de dispositifs, meilleure que 10^{-9} , est telle qu'ils ont été choisis par la CGPM en 1987 pour servir de références pour les mesures de tension et de résistance en donnant des valeurs conventionnelles à K_J et R_K . Ces valeurs sont utilisées pour la métrologie électrique depuis 1990. Depuis cette date, les mesures électriques de haute précision n'utilisaient donc plus comme référence la définition de l'ampère : les unités électriques avaient repris leur indépendance par rapport au SI.

Enfin, la définition du kelvin, en faisant appel à une température particulière, celle du point triple de l'eau, posait la question de la mesure dans des gammes de température très éloignées de celle-ci. On utilisait en pratique des phénomènes variés dans lesquels une loi physique dépend de la température (pression dans un gaz, résistance de platine, rayonnement du corps noir, etc.), mais les erreurs d'étalonnage des thermomètres étaient d'autant plus importantes qu'on s'éloignait du point triple de l'eau.

Comment quatre unités ont été redéfinies

En 2011, la 24^e CGPM a pris acte, dans sa Résolution 1, du projet de redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin en fixant les valeurs numériques de quatre constantes de la physique : la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann. Elle a alors encouragé les chercheurs du monde entier à mesurer le plus précisément possible ces quatre constantes dans le cadre du SI en cours [1].

Pour la constante de Planck h , on peut utiliser la balance de Kibble qui permet de comparer une puissance électrique à une puissance mécanique (voir l'article de M. Thomas *et al.*, p. 18). En s'appuyant sur les relations donnant R_K et K_J , cette balance donne accès au rapport h/M entre la constante de Planck et une masse étalon avec une incertitude de quelques 10^{-8} . On a donc pu déterminer h avec cette balance en se référant à l'étalon du kg.

Pour la constante d'Avogadro N_A , la mesure a été réalisée par la collaboration internationale IAC (International Avogadro Constant) en comptant le nombre d'atomes dans une sphère de silicium 28 et en se référant à la masse molaire du silicium, précisément comparée à celle du carbone 12 (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22).

En pratique, la valeur de la constante de Planck a été déterminée à partir de deux types de mesures : celles données par différentes balances de Kibble dans le monde, mais aussi celle déduite de l'étude de la sphère de silicium par la collaboration IAC, en s'appuyant sur les mesures de l'effet de recul sur des atomes froids (voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22). Cet effet de recul donne en effet accès au rapport h/m entre la constante de Planck et la masse m d'un atome, tandis que la sphère de silicium donne le rapport entre la masse macroscopique de la sphère et la masse d'un atome qui la compose. Les deux voies indépendantes pour obtenir h , dont l'une passe par les unités électriques et l'autre non, ont donné des résultats en bon accord et avec des incertitudes relatives comparables d'un peu plus de 10^{-8} . Le lien entre elles est illustré sur la figure 2.

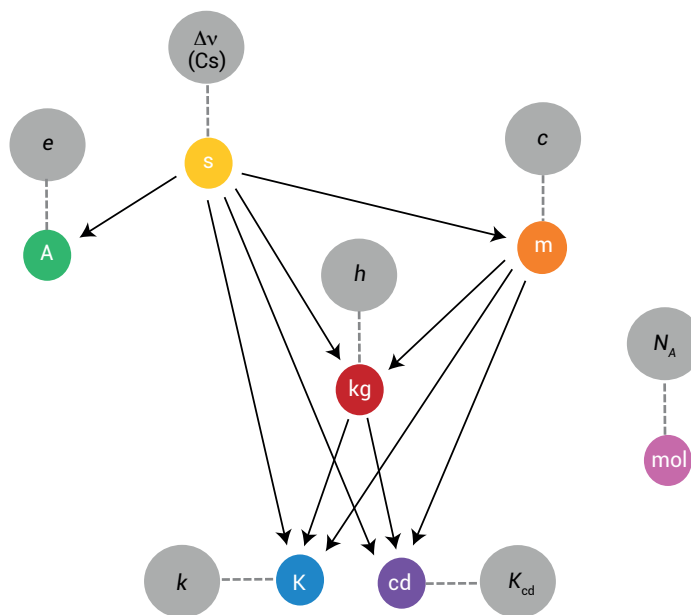
La valeur de la constante de Planck étant déterminée, on a pu en déduire celle de la charge élémentaire e à partir de l'expression de la constante de structure fine $\alpha = e^2/2\epsilon_0hc$ qui est connue expérimentalement avec une grande précision (voir P. Cladé et L. Julien, *Reflets de la physique*, 59 (2018) 4-9).

Enfin, trois types d'expériences ont contribué à la détermination de la constante de Boltzmann k . Elles consistaient à mesurer l'une ou l'autre des grandeurs suivantes, en se référant au point triple de l'eau : la constante diélectrique de l'hélium, l'amplitude du bruit thermique dans un conducteur (bruit Johnson), ou la vitesse du son dans un gaz parfait (thermométrie acoustique). C'est ce dernier type d'expérience qui a donné les résultats les plus précis. Il a été mis en œuvre au LNE-CNAM et est décrit dans l'article de L. Pitre *et al.* (p. 29).

À la suite de l'ajustement des constantes fondamentales réalisé par le CODATA en 2017 (voir l'article de F. Nez, p. 17) et de la proposition du CIPM réuni en octobre de cette même année, la 26^e CGPM a entériné le choix des valeurs numériques suivantes pour la constante de Planck, la charge élémentaire, la constante d'Avogadro et la constante de Boltzmann :

- $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s
- $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C
- $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹
- $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J K⁻¹

Ce faisant, quatre autres constantes ont perdu leurs valeurs numériques exactes et seront susceptibles d'être remesurées à l'avenir :



3. Relations de dépendance entre les unités du nouveau SI et les constantes physiques fondamentales. Dans le nouveau SI, toutes les unités de base sauf la mole sont définies à partir de la seconde. Avec les valeurs numériques fixées de c et e , l'ampère et le mètre se déduisent de la seconde. Avec la valeur de h , le kilogramme se déduit de la seconde et du mètre, puis, en fixant les valeurs de k et K_{cd} , le kelvin et la candela se déduisent de la seconde, du mètre et du kilogramme. La mole, elle, est déconnectée des autres unités.

- la masse du prototype international \mathcal{K} , qui ne vaudra plus exactement 1 kg,
- la perméabilité du vide, qui ne vaudra plus exactement $4\pi \cdot 10^{-7}$ en unités SI,
- la masse molaire du carbone 12, qui ne vaudra plus exactement $12 \cdot 10^{-3}$ kg,
- la température du point triple de l'eau qui ne sera plus exactement 273,16 K.

De façon générale, les dispositifs qui ont servi à mesurer jusqu'ici les valeurs des constantes h , e , N_A et k en utilisant les anciens étalons pourront être utilisés à l'avenir pour la réalisation des unités redéfinies : par exemple la balance de Kibble, avec la valeur fixée de h , permettra de mesurer des masses macroscopiques, et la vitesse du son dans un gaz parfait, avec la valeur fixée de k , permettra de mesurer des températures.

Les quatre unités redéfinies par la 26^e CGPM, comme celles qui ne changent pas, ont des nouvelles définitions exprimées avec des formulations « à constante explicite » (www.bipm.org/fr/CGPM/db/26/1/), par exemple : « Le kilogramme, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité équivalente au $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{Cs}$ ».

Avec leurs nouvelles définitions, le kilogramme, l'ampère et le kelvin, comme le mètre et la candela, sont définis à partir de la seconde : cette relation de dépendance est illustrée dans la figure 3. La mole se trouve déconnectée du kilogramme, comme elle l'était déjà des autres unités ; de son côté, le kelvin fait le chemin inverse en se raccordant aux unités mécaniques. Le kilogramme étalon de 1889 devient un objet de musée, comme l'a été avant lui le mètre étalon.

Dans quelques années, la seconde sera à nouveau redéfinie grâce aux progrès spectaculaires des horloges optiques. La fréquence d'une nouvelle transition atomique sera fixée, non plus dans le domaine micro-onde mais dans le domaine optique. Mais la nouvelle définition n'affectera pas celles des autres unités de base du SI, qui continueront à en découler de la même façon.

Le nouveau SI constitue un ensemble cohérent ; en s'appuyant sur des constantes de la nature, il répond encore mieux au vœu d'universalité qui avait inspiré la création du système métrique. ■

Référence

1 • P.J. Mohr *et al.*, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* 55 (2018) 125-146.

Le CODATA (Comité de données pour la science et la technologie)

François Nez (francois.nez@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel, (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris
Membre du Task Group on Fundamental Constants du CODATA

Le CODATA (www.codata.org) est un comité du Conseil international pour la science^(a) (ICSU). Un sous-groupe de travail du CODATA est chargé des constantes fondamentales, le "Task Group on Fundamental Constants". Il se réunit chaque année et regroupe une quinzaine de scientifiques de différents pays, dont un membre français. Sa tâche consiste, à partir de toutes les mesures de grandeurs physiques reliées à ces constantes, publiées à un moment donné, de fournir la meilleure estimation possible des valeurs numériques des constantes fondamentales. Par « meilleure estimation », il faut entendre celle qui reproduit au mieux l'ensemble des résultats expérimentaux publiés.

Depuis 1998, un ajustement par moindres carrés de la valeur de ces constantes est réalisé tous les quatre ans à partir de l'ensemble des données mesurées, puis les conclusions sont publiées. On obtient ainsi un ensemble cohérent de valeurs numériques pour plus de 300 constantes physiques, telles que la masse de l'électron, la charge électrique élémentaire, la constante de Planck ou celle de la gravitation, entre autres. Pour l'ajustement, les données entrées sont *a priori* affectées d'un poids qui est inversement proportionnel au carré de l'incertitude de mesure, comme si les dispersions des résultats de mesures étaient d'origine statistique. Cependant, chaque publication est analysée en détail par le comité et un soin particulier est porté aux corrélations entre différentes mesures d'une même donnée, par exemple celles réalisées avec le même dispositif à des dates différentes. Dans des cas de désaccords inexplicables entre plusieurs mesures, il peut arriver que le comité soit amené à affecter aux mesures une incertitude supérieure à celle qui est publiée. La méthode suivie est expliquée en détail en annexe de la



Les participants à la réunion du Task Group on Fundamental Constants du CODATA, au BIPM (Pavillon de Breteuil, Sèvres, France), 3-4 novembre 2014.

publication des résultats de l'ajustement de 1998 [1].

Après celui effectué en 2014, un ajustement spécial a été réalisé en 2017 pour obtenir les meilleures valeurs à cette date des quatre constantes qui devaient servir à redéfinir le kilogramme, l'ampère, la mole et le kelvin ; il s'agit des constantes h (constante de Planck), e (charge élémentaire), N_A (constante d'Avogadro) et k (constante de Boltzmann). Au vu des valeurs déduites de cet ajustement, entachée chacune d'une incertitude, le CIPM (Comité international des poids et mesures) a déterminé en octobre 2017 les valeurs numériques qu'il a proposé de fixer pour les quatre constantes dans le cadre de la redéfinition du SI [2]. Ces valeurs ont été entérinées par la CGPM (Conférence générale des poids et mesures) le 16 novembre dernier et sont intégrées dans les nouvelles définitions des unités

entrées en vigueur le 20 mai 2019. Un nouvel ajustement a depuis été réalisé dans lequel, comme la vitesse de la lumière c , ces constantes ont maintenant une valeur déterminée. ■

(a) Le Conseil international pour la science (ICSU) est un organisme fondé en 1931, dont l'objectif est de renforcer l'activité scientifique internationale au bénéfice de la société. Son siège est à Paris. Il réunit actuellement 31 unions scientifiques internationales (par exemple l'IUPAP, Union internationale de physique pure et appliquée) et 121 membres nationaux (dont l'Académie des sciences pour la France) couvrant 141 pays. L'ICSU est financée par les contributions de ses membres et par des contrats avec d'autres institutions comme l'UNESCO.

Références

- 1• P.J. Mohr et B.N. Taylor, *Rev. Mod. Phys.* **72** (2000) 351-495.
- 2• P.J. Mohr et al., *Metrologia* **55** (2018) 125-146.

La redéfinition du kilogramme et la balance de Kibble

Matthieu Thomas (Matthieu.Thomas@lne.fr), Patrick Espel, Djamel Ziane, Patrick Pinot et François Piquemal

Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 rue Roger Hennequin, 78197 Trappes

Depuis le 20 mai 2019, l'étalonnage d'une masse macroscopique peut se faire avec une précision pouvant atteindre 10^{-8} à l'aide d'une balance de Kibble, à partir d'une valeur connue fixée de la constante de Planck h , en passant par des étalons électriques.

La définition précédente du kilogramme et ses faiblesses

Le prototype international du kilogramme, cylindre de platine iridié (alliage de 90 % de platine et 10 % d'iridium) de diamètre et de hauteur égaux à 39 mm, est l'artefact qui réalisait depuis 1889 la définition de l'unité de masse dans le Système international (SI). Cet artefact, identifié par la lettre \mathcal{K} (connu comme « le grand K »), est toujours conservé dans l'air, sous trois cloches de verre au pavillon de Breteuil du BIPM, à Sèvres.

La masse de \mathcal{K} était par définition toujours égale à 1 kg exactement (avec par conséquent une incertitude nulle), même si la quantité de matière que contient l'artefact évoluait. Cette définition posait plusieurs problèmes :

- \mathcal{K} était le seul moyen de réalisation de l'unité SI de la masse, et il ne pouvait être remplacé par un autre prototype en cas de détérioration ou de destruction.
- La masse réalisée par \mathcal{K} était de 1 kilogramme : l'étalonnage des masses très éloignées de cette valeur ponctuelle, en particulier pour les faibles masses, était délicate.
- Les conditions de conservation de \mathcal{K} devaient être maîtrisées pour contrôler sa stabilité à long terme. Ceci impliquait de limiter au strict nécessaire son utilisation, mais aussi de lui appliquer une méthode spécifique de nettoyage-lavage.
- Sa disponibilité en un seul lieu rendait la vérification des quelques soixante prototypes nationaux possible seulement s'ils étaient tous rassemblés au BIPM pour une durée de deux ou trois années. Ces

vérifications n'ont donc eu lieu que tous les cinquante ans environ.

- Des vérifications impliquant la comparaison de \mathcal{K} et des six copies officielles conservées dans les mêmes conditions que le prototype montraient une dispersion de l'évolution temporelle de l'ordre de $50 \mu\text{g}$ sur un siècle. Ce résultat était un indice fort de l'évolution de la masse de \mathcal{K} par rapport à une référence stable, comme la masse d'un atome. Alors, avec cette définition de l'unité de masse, on arrivait à la conclusion que la masse de \mathcal{K} ne variait pas, tandis que celle d'un atome de carbone 12 par exemple dans le SI, pouvait varier au cours des décennies : cela était loin d'être satisfaisant.

Pour des raisons de disponibilité, de pérennité et d'universalité du kilogramme, il était donc indispensable d'en changer la définition.

Quelle constante fondamentale choisir pour définir le kilogramme ?

Les réflexions menées au sein de la communauté internationale depuis plus d'une décennie ont abouti à un consensus en faveur d'une définition du kilogramme à partir de la constante de Planck h au détriment de la définition alternative fondée sur la constante d'Avogadro N_A , selon laquelle le kilogramme serait constitué d'un nombre donné d'atomes.

Deux arguments principaux expliquent ce choix. Tout d'abord, h fait partie des « constantes dimensionnées les plus fondamentales » [1] de la physique, comme la vitesse de la lumière c , par exemple : h est

constubstantielle à la physique quantique comme c l'est à la relativité. De plus, fixer h et la valeur de la charge électrique élémentaire e (définition de l'ampère) implique que la constante de Josephson $K_J = 2e/h$ et la constante de von Klitzing $R_K = h/e^2$ ont des valeurs exactes dans le SI (voir à ce sujet l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25) : cela entraîne immédiatement une amélioration significative de la réalisation de toutes les unités électriques dans le SI.

La modification de la définition du kilogramme s'inscrit donc dans une redéfinition globale des unités du SI, permettant d'élaborer un système d'unités reposant entièrement sur des constantes de la nature.

Quelles conditions pour la nouvelle définition du kilogramme ?

Deux méthodes permettent de réaliser le kilogramme dans le nouveau SI : les expériences de balance de Kibble, décrites dans cet article, et la méthode XRCD (*X-ray crystal density*, voir l'article de P. Cladé et S. Guellati, p. 22). L'adoption de la nouvelle définition du kilogramme sous-tendait alors le respect des conditions suivantes :

1) qu'au moins trois expériences indépendantes, comprenant à la fois des expériences de balance de Kibble et des expériences mettant en jeu une sphère de monocristal de silicium caractérisée par la méthode XRCD, donnent des valeurs cohérentes de h avec des incertitudes-types relatives n'excédant pas $5 \cdot 10^{-8}$;

2) qu'au moins l'un de ces résultats présente une incertitude-type relative qui n'excède pas $2 \cdot 10^{-8}$;

3) et que les prototypes et l'ensemble d'étalons de masse de référence du BIPM, ainsi que les étalons de masse utilisés dans les expériences de la balance de Kibble et XRCD, soient comparés le plus directement possible à \mathcal{K} .

Une telle exigence sur les niveaux d'incertitude était nécessaire pour garantir la continuité historique de la valeur du kilogramme et pour prendre en compte les besoins communs à la métrologie industrielle et à la métrologie légale en termes d'étalonnage des poids et des instruments de pesage.

Quatre des treize expériences de balance de Kibble en cours de développement à travers le monde ont pu fournir à la date du 1^{er} juillet 2017 des valeurs de h avec des incertitudes suffisamment compétitives pour être prises en compte dans ce qui devait être l'ultime ajustement de la valeur de h par le CODATA (voir l'article de F. Nez, p. 17, et la référence [2]). De plus, ces résultats répondaient aux trois conditions de la redéfinition, permettant à la 26^e CGPM de définir le kilogramme par référence à une valeur fixe de la constante de Planck, le 16 novembre 2018.

Ainsi, après des décennies de développement, le NRC (National Research Council, Canada), le NIST (National Institute for



© LNE

1. La balance de Kibble du LNE. Voir le schéma de la figure 2, page 21.

Science and Technology, États-Unis) et le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais, France) avec des balances différentes, mais également le Consortium Avogadro et le NMIJ (National Metrology Institute of Japan), ces deux derniers au moyen de la méthode XRCD appliquée à des sphères de silicium, ont contribué à la fixation de la valeur « définitive » de la constante de Planck.

Balance de Kibble et détermination de la constante de Planck

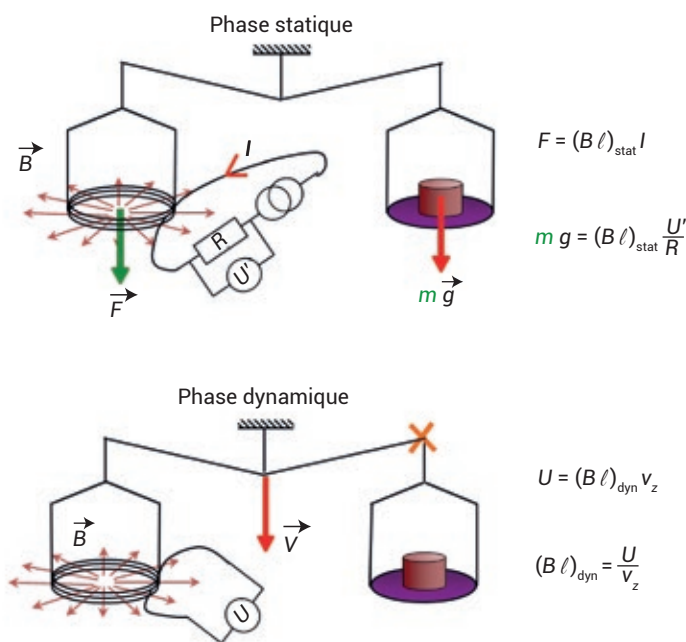
Le principe du dispositif expérimental proposé par Brian Kibble en 1976 consiste en une comparaison virtuelle de puissances électrique et mécanique mesurées au cours de deux phases, statique et dynamique (fig. 1).

Dans la phase statique, le poids mg d'une masse étalon m soumise à l'accélération de la pesanteur g est équilibré par la force (verticale) de Laplace F exercée sur un conducteur (une bobine horizontale) de longueur ℓ parcouru par un courant I lorsqu'il est immergé dans un champ radial, horizontal et homogène, d'induction magnétique B (c'est-à-dire dans l'entrefer d'un circuit magnétique de symétrie cylindrique). Pour un alignement parfait du système, cet équilibre est décrit par la relation $mg = (B\ell)_{\text{stat}} I$, où I peut être mesuré par la chute de potentiel U' qu'il produit aux bornes d'une résistance R .

Dans la phase dynamique, la même bobine est déplacée à une vitesse verticale v_z dans le même champ d'induction magnétique B . De nouveau, si le système est parfaitement aligné, la loi de Lenz conduit à une chute de tension U aux bornes de la bobine, donnée par la relation : $U = (B\ell)_{\text{dyn}} v_z$.

Si le flux magnétique, la longueur du conducteur et les positions relatives du conducteur et du flux magnétique dans les deux phases sont inchangés pendant le temps de mesure, alors $(B\ell)_{\text{stat}} = (B\ell)_{\text{dyn}}$, et la combinaison des deux relations peut être réexprimée comme l'égalité des puissances électrique et mécanique virtuelles (et donc notamment sans pertes par effet Joule) : $mgv_z = UI = UU'/R$.

Les tensions se mesurent par comparaison à l'effet Josephson ; on a donc $U = n_U f_U / K_J$ dans le cas dynamique (resp. $U' = n_U' f_U' / K_J$ dans le cas statique)



1. Principe de la balance de Kibble.

En phase statique, un courant I (environ 5 mA), générant une chute de tension U' (environ 1 V) aux bornes d'une résistance R (environ 200 Ω), équilibre une force de Laplace $F = (B\ell)_{\text{stat}} I$ appliquée à une bobine de longueur ℓ et le poids d'une masse étalon mg (environ 5 N). En réalité, les deux forces sont comparées à la même extrémité du fléau.

En phase dynamique, le fléau est bloqué en position horizontale (croix rouge) et déplacé avec sa suspension à la vitesse v_z (environ 2 mm s⁻¹) verticale sur une longueur de 40 mm dans l'entrefer du circuit magnétique. Une tension $U = (B\ell)_{\text{dyn}} v_z$ (environ 1 volt) est alors générée à ses bornes. Si $(B\ell)_{\text{stat}} = (B\ell)_{\text{dyn}}$ (environ 500 N A⁻¹), la combinaison des deux relations peut être réexprimée : $mgv_z = UI$ (environ 5 mW). Il s'agit d'un équilibre de puissance, d'où le nom initial « balance du watt » (à présent balance de Kibble).

avec d'une part n_U (n_U') le numéro d'ordre de la marche de Shapiro utilisée et d'autre part f_U (f_U') la fréquence d'irradiation de la jonction Josephson par une onde électromagnétique. Les résistances se mesurent par comparaison à un étalon de résistance à effet Hall quantique ; on a donc $R = R_K/i$, avec i l'indice du plateau utilisé (voir l'article de S. Djordjevic *et al.*, p. 25).

On peut alors exprimer h en fonction de m , mais également la masse m en fonction de h : $h = (4gv_z / A) m$, $m = (A / 4gv_z) h$, où $A = n_U n_U' i f_U f_U'$. La charge élémentaire e est éliminée dans le produit $K_J^2 R_K = 4/h$. Ainsi, la mesure des tensions et courants par comparaison à des étalons quantiques réalise une relation linéaire entre la masse macroscopique et la constante de Planck.

Avant la révision du SI, une balance de Kibble permettait de déterminer la valeur de h dans le SI en partant d'une valeur connue de masse (*i.e.* étalonnée par rapport

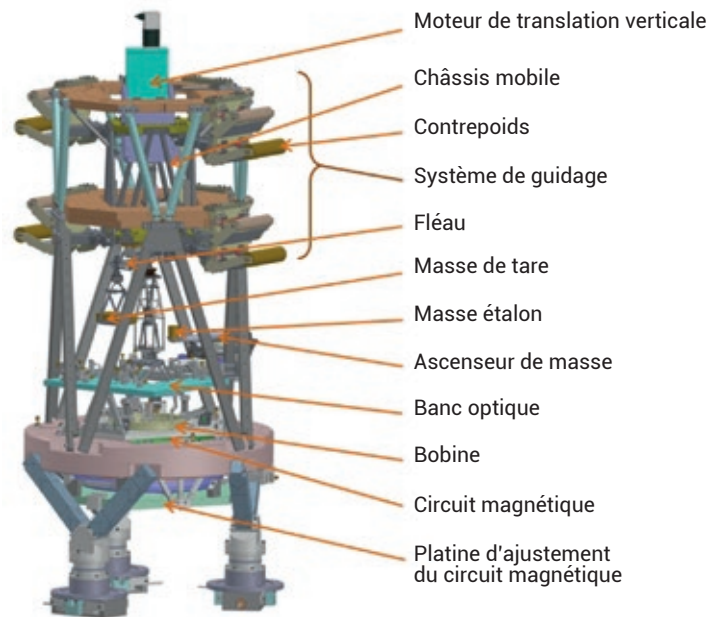
à \mathcal{K}). Depuis le 20 mai 2019, une balance de Kibble permet de déterminer une valeur de masse dans le SI à partir d'une valeur connue (fixée) de h .

Des solutions techniques variées sont employées pour réaliser une balance de Kibble. Celle du LNE, en France, présente par exemple comme caractéristiques (fig. 2) sa phase dynamique où le comparateur de force (fléau de la balance et sa suspension) de la phase statique est déplacé dans son ensemble afin d'éviter l'utilisation du fléau comme générateur de mouvement.

Lors de la phase statique, la comparaison de forces est assurée par un fléau (longueur 20 cm) à lames bicirculaires taillées dans la masse (épaisseur au col 40 μm). Le fléau compare en réalité des moments et, de manière à s'affranchir de la connaissance du rapport des longueurs des deux bras, on compare la force de Laplace au poids du

même bras : un capteur assure la connaissance de la position angulaire de l'extrémité du fléau à mieux que $10 \mu\text{rad}$. Typiquement, la succession de 5 doubles pesées (avec et sans masse étalon de 500 g, la mesure de g étant assurée en temps réel par un gravimètre à atomes froids situé à proximité) prend une heure : les courants nécessaires pour assurer les asservissements sont de l'ordre de 5 mA (soit 1 V mesuré aux bornes d'une résistance de 200Ω). Les tensions sont mesurées par comparaison à un étalon Josephson, la résistance est une résistance de transfert raccordée à un étalon à effet Hall quantique.

Lors de la phase dynamique, la bobine est déplacée verticalement, au moyen d'un système de guidage à lames flexibles pincées à la vitesse de 2 mm s^{-1} sur une distance de 40 mm : une centaine de montées et descentes est réalisée en une heure, les vitesses étant mesurées par la fréquence Doppler générée à la sortie d'interféromètres mesurant la position verticale de la bobine. Chaque interféromètre est irradié par un laser dont la fréquence est asservie sur une raie de la structure hyperfine du diode I_2 , raie faisant partie des mises pratiques recommandées du mètre. Le déplacement de la bobine dans le champ magnétique de 1 T génère une tension de 1 V : la vitesse de la bobine est mesurée de manière synchrone (avec une précision meilleure que la microseconde) aux durées d'intégration des voltmètres.



2. Les différentes composantes de la balance de Kibble du LNE (cuve à vide non représentée).

La *moteur de translation verticale* déplace le châssis mobile qui soutient le *fléau*. Grâce aux *contrepoids*, il n'a besoin que de générer une force de l'ordre de 10 N. Le *système de guidage* à lames flexibles assure un déplacement vertical et rectiligne de l'ensemble *fléau / suspension / bobine* verticalement dans l'entrefer du *circuit magnétique*. Ce déplacement à vitesse constante (mesurée par des interféromètres et un système optique situé sur le *banc optique*) génère une tension aux bornes de la bobine (phase dynamique).

Le *fléau* assure la comparaison de forces entre le poids de la *masse étalon* et la force de Laplace générée par le courant circulant dans la *bobine* plongée dans le *circuit magnétique*. Ces deux forces s'appliquent à l'extrémité du fléau grâce à une *suspension* double, coaxiale et articulée. Une *tare* compense la masse morte suspendue au fléau (phase statique).

La *platine d'ajustement du circuit magnétique* permet d'assurer l'horizontalité du *circuit magnétique*.

Mise en pratique de la nouvelle définition du kilogramme

La nouvelle définition du kilogramme peut être réalisée par n'importe quel laboratoire ou groupement de laboratoires qui peuvent alors disséminer l'unité de kilogramme de leurs étalons de masse primaires (artefacts étalonnés par une méthode primaire : méthode XRCD ou expérience de balance de Kibble, qui présente l'avantage de pouvoir réaliser en principe une valeur de masse quelconque) vers n'importe quel autre laboratoire ou, plus généralement, vers les utilisateurs au travers d'étalons de masse secondaires. Néanmoins, ils seront tenus à participer périodiquement à une comparaison internationale de leurs étalons de masse primaires sous l'égide du BIPM pour assurer la véri-

fication de la cohérence des différentes réalisations de l'unité de masse au moyen d'un ensemble de masses de référence.

En France, le nouveau système de dissémination comprendra, dans le même esprit qu'au BIPM, un ensemble d'étalons de masse de 1 kg permettant de disposer à tout instant d'une valeur nationale du kilogramme. Cette valeur sera calculée à partir de la valeur moyenne pondérée des étalons constituant cet ensemble, ces derniers étant étalonnés périodiquement par la balance de Kibble du LNE.

Le jour de la mise en application de la nouvelle définition du kilogramme, le 20 mai 2019, la masse $m(\mathcal{K})$ du prototype international est restée 1 kg (mais avec une incertitude-type relative de $1 \cdot 10^{-8}$) et toutes

les valeurs de masse traçables à \mathcal{K} ont été inchangées. Mais désormais, l'étalonnage d'une masse devra se réaliser au moyen d'une balance de Kibble (ou d'une sphère de silicium) : chaque pays, comme la France, disposant d'une telle méthode primaire peut réaliser de manière indépendante l'unité SI de la masse, le kilogramme. ■

Références

- 1• J.P. Uzan et R. Lehoucq, *Les constantes fondamentales*, Belin (2005).
- 2• P.J. Mohr *et al.*, "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* **55** (2018) 125-146.

Mesurer une masse grâce à l'impulsion d'un photon

Pierre Cladé (pierre.clade@lkb.upmc.fr) et Saïda Guellati-Khélifa (saida.guellati@lkb.upmc.fr)

Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Université PSL, Collège de France), 4 place Jussieu, 75005 Paris

La mesure par effet Doppler du recul d'un atome par absorption d'un photon permet de mesurer la masse de cet atome avec une très haute précision ($\sim 10^{-10}$). Le lien entre masse macroscopique et masse atomique est obtenu par comptage du nombre d'atomes d'une sphère monocristalline de silicium.

La physique quantique pour mesurer les masses

La 26^e Conférence générale des poids et mesures a décidé de définir l'unité de masse en fixant la valeur de la constante de Planck h . Cette définition fait donc reposer la réalisation de toutes les unités qui dépendent du kilogramme sur des phénomènes quantiques. C'est le cas, par exemple, des grandeurs électriques dont les mesures s'appuient sur l'effet Josephson et l'effet Hall quantique. La constante de Planck sert avant tout à mesurer les énergies à l'échelle quantique : elle a été introduite comme constante permettant de lier la fréquence d'un photon à son énergie. Dans la balance de Kibble, on compare l'énergie (ou la puissance) électrique (mesurée par rapport à h) à l'énergie potentielle de pesantier d'une masse (voir l'article de M. Thomas *et al.*, p. 18). En fait, en fixant h , c'est l'unité d'énergie, plus que celle de masse, que l'on a fixée. D'ailleurs, le texte de la résolution l'indique explicitement, puisque la valeur numérique de h y est exprimée en J s.

Cependant, il est possible de relier la constante de Planck à une masse par une autre méthode, qui utilise la conservation de l'impulsion. Cette méthode, décrite ci-dessous, repose sur le recul d'un atome qui absorbe un photon et donne accès à une masse atomique. Utilisée conjointement avec la mesure du nombre d'atomes dans une sphère monocristalline de silicium, elle constitue une alternative à la balance de Kibble (voir la figure 2 de l'article de L. Julien, p. 15).

Dans un faisceau lumineux monochromatique de fréquence ν , chaque photon possède une énergie égale exactement à $h\nu$ et une impulsion qui vaut $hk = h\nu/c$ (si ce faisceau constitue une onde plane). Lorsqu'un photon est absorbé par un objet massif (par exemple un atome de masse m), il va transférer sa quantité de mouvement à cet objet, lequel va reculer avec une vitesse inversement proportionnelle à sa masse. Cette vitesse, que l'on appelle vitesse de recul, vaut $v_r = h\nu/mc$. Dans le nouveau SI, où h et c sont fixées, la mesure de cette vitesse, associée à celle de la fréquence du photon, permet donc de déterminer directement la masse de l'objet.

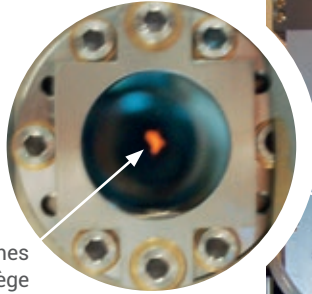
Mesure du recul atomique

L'expérience permettant de mesurer précisément cette vitesse de recul (fig. 1) a été décrite dans le numéro 59 de *Reflets de la physique* (p. 8). Nous en rappelons ici brièvement le principe.

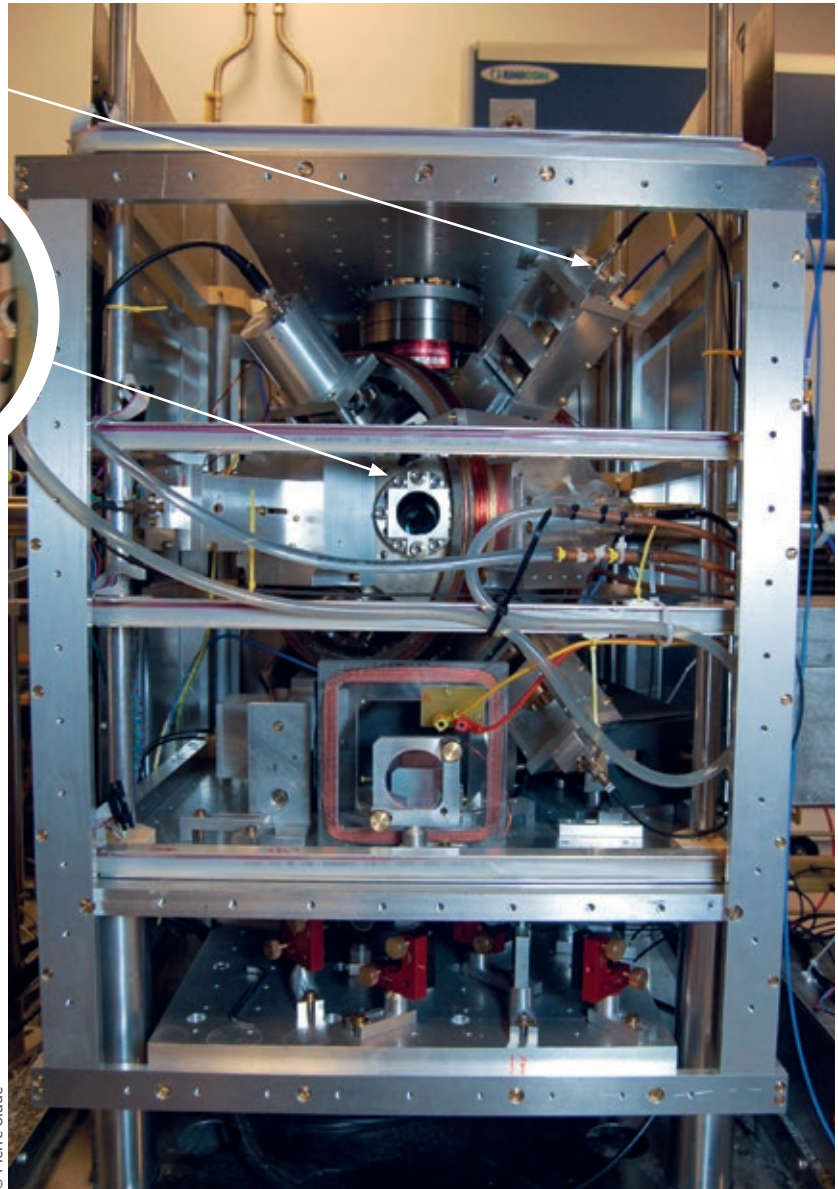
L'effet Doppler est utilisé pour connaître précisément le changement de vitesse des atomes. En comparant la fréquence d'une transition avant et après l'absorption d'un photon, il est possible de déterminer ce changement de vitesse. Pour transférer la vitesse de recul aux atomes, on peut utiliser non seulement l'absorption, mais aussi l'émission stimulée d'un photon : dans ce cas, l'atome émet un photon dans la même direction que celle du faisceau laser incident. Si ce faisceau laser va dans la direction opposée à celle du faisceau utilisé pour l'absorption, alors les deux impulsions de



Laser du piège
(fibre optique et collimateur)



Fluorescence d'atomes
de rubidium dans un piège
magnéto-optique



© Pierre Cladé

1. Dispositif expérimental utilisé au Laboratoire Kastler Brossel pour mesurer la vitesse de recul d'un atome de rubidium.

recul sont de même sens. L'utilisation d'atomes froids, de vitesse initiale bien connue, nous permet d'avoir une mesure très précise de la variation de vitesse des atomes. Dans l'expérience menée au Laboratoire Kastler Brossel, on arrive par exemple à réaliser le processus d'absorption-émission stimulée exactement 500 fois, ce qui permet de transférer aux atomes une vitesse de $1000 v_r$ soit environ 6 m s^{-1} , et donne un effet Doppler de 15 MHz. Dans cet exemple, on dispose de quelques dizaines de millisecondes pour effectuer la mesure ; ceci limite la résolution à environ 100 Hz. Avec un rapport signal-à-bruit de l'ordre de 30 et une moyenne sur plusieurs dizaines de milliers de réalisations, il est possible de connaître l'effet Doppler avec une précision de 10 mHz. On arrive ainsi à une précision relative meilleure que 10^{-9} sur la vitesse de recul.

L'expérience est extrêmement sensible et, comme dans beaucoup d'expériences de métrologie, ce sont les effets systématiques qui limitent l'exactitude finale. Parmi les effets les plus importants, on peut citer tous ceux liés à des déplacements des niveaux d'énergie des atomes (par exemple : déplacement Zeeman, déplacement lumineux ou de champ moyen). Ces déplacements sont liés à une configuration particulière de l'expérience et peuvent tous en théorie être contrôlés. Il reste cependant un effet systématique plus fondamental : pour connaître l'impulsion d'un photon, il faut que celui-ci soit dans une onde plane. Or il ne sera jamais possible de réaliser une onde plane parfaite, et il faudra toujours tenir compte des corrections à l'impulsion

du photon. Par exemple, pour un faisceau gaussien de diamètre 1 cm, une correction de l'ordre de 2×10^{-9} devra être appliquée. De même, toute perturbation du front d'onde ou de l'intensité du faisceau due à des défauts optiques induira un effet systématique. En étudiant précisément ces limites, nous avons pu réaliser en 2011 une mesure sur l'atome de rubidium avec une précision de $1,2 \times 10^{-9}$. Plus récemment, le groupe de H. Müller à Berkeley aux États-Unis a réalisé une mesure sur l'atome de césium avec une incertitude finale de 4×10^{-10} . Ces deux mesures du recul atomique sont les plus précises à ce jour.

Des masses atomiques aux masses macroscopiques

L'expérience de recul que nous avons décrite permet de mesurer la masse d'un atome particulier. Il existe aussi des expériences permettant de mesurer précisément le rapport de masse entre deux atomes. Pour cela, on ionise un atome et on le place dans un piège de Penning^(a). Le champ uniforme du piège crée pour l'ion un mouvement cyclotron de quelques MHz, qui dépend du rapport masse-sur-charge de l'ion. La mesure du rapport des fréquences



2. Sphère presque parfaite de silicium et les différentes étapes ayant mené à sa réalisation.

cyclotron de deux espèces placées dans le même champ magnétique permet de déterminer leur rapport de masse. Des précisions meilleures que 10^{-10} sont atteintes. À partir du recul atomique effectué sur le rubidium ou le césium, il est donc possible de mesurer avec une précision comparable la masse de la plupart des atomes.

Enfin, une masse macroscopique peut être reliée à une masse atomique grâce à la méthode dite XRCD (X-Ray Crystal Density method). Cette expérience est conceptuellement très simple : il s'agit d'élaborer un cristal pur de silicium et d'en compter le nombre d'atomes. Pour cela, une sphère monocristalline quasiment parfaite est réalisée (fig. 2). En mesurant le volume de cette sphère et en le comparant au volume d'une maille du cristal, on déduit le nombre d'atomes et donc la masse de la sphère. En pratique, ce projet est un véritable défi expérimental. Il est réalisé au sein d'une collaboration internationale : l'International Avogadro Coordination (IAC). Dans l'idéal, il faudrait disposer d'un cristal parfait, c'est-à-dire isotopiquement et chimiquement pur, ainsi que sans défaut cristallin. Il s'agit là de la principale limitation de la précision. Pour réduire l'incertitude liée à la composition isotopique, du silicium enrichi à plus de 99,99% en isotope ^{28}Si est préparé. Un monocristal de plusieurs kilogrammes est ensuite fabriqué. À partir de ce cristal, deux sphères semblables sont taillées.

D'autres échantillons sont aussi prélevés pour mesurer la concentration isotopique à l'aide d'un spectromètre de masse et pour étudier la structure du cristal. Ce dernier n'étant pas parfaitement homogène, des mesures sur plusieurs échantillons sont nécessaires afin d'interpoler les résultats au niveau de chaque sphère.

La structure du cristal est étudiée en combinant un interféromètre à rayons X et un interféromètre optique. Lorsque l'on déplace un élément de l'interféromètre à rayons X, le signal varie avec une période spatiale correspondant à la taille de la maille cristalline. En mesurant ce déplacement à l'aide d'un interféromètre optique, on est donc capable de déduire la taille de chaque maille. Un autre interféromètre optique est aussi utilisé pour mesurer le diamètre de la sphère et, plus précisément, les corrections qui existent par rapport à la sphère parfaite. En 2017, les chercheurs de la collaboration IAC ont pu mesurer le rapport entre la masse d'une sphère et celle de l'atome de silicium avec une précision de $1,2 \times 10^{-8}$. Cette incertitude provient principalement de celle sur la mesure du diamètre de la sphère, ainsi que de la contamination chimique de sa surface.

Le recul comme mesure d'une masse

Dans le nouveau SI, la balance de Kibble permet la réalisation pratique du kilogramme, grâce à la mesure de masses macroscopiques à partir de leur poids et en passant par des étalons électriques. Le recul atomique, que l'on a présenté dans cet article, donne accès directement à la mesure d'une masse atomique avec une précision meilleure que 10^{-9} , ce qui dans le nouveau SI en fait la plus précise des mesures de masses.

En outre, nous pensons que cette méthode consistant à mesurer la vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon, constitue un moyen relativement simple de comprendre le lien entre la constante de Planck h et les masses dont elle définit l'unité : fixer la valeur de h à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$, revient finalement à dire que le kilogramme est 10^{25} fois la masse d'un atome initialement au repos, qui, en absorbant un photon de longueur d'onde $1 \mu\text{m}$ se propageant dans une direction donnée, acquerrait^(b) une vitesse de recul de $6,626\,070\,15 \text{ mm/s}$. ■

(a) Un piège de Penning est un dispositif de symétrie cylindrique permettant de confiner des particules chargées pendant une durée suffisamment longue, en utilisant un champ magnétique statique uniforme appliqué selon l'axe z et un champ électrique quadripolaire qui évite que les particules sortent du piège lorsqu'elles suivent les lignes de champ magnétique.

(b) Nous employons le conditionnel, cette définition restant fictive, car un tel atome n'existe pas.

Les étalons électriques quantiques

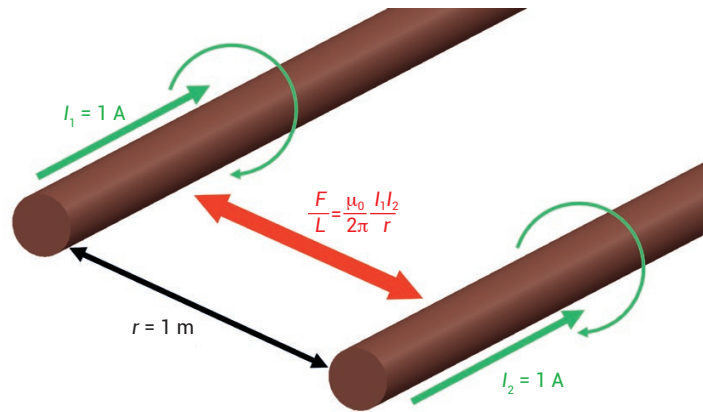
Sophie Djordjevic (sophie.djordjevic@lne.fr), Wilfrid Poirier, Félicien Schopfer et Olivier Thévenot
Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 29 avenue Hennequin, 78197 Trappes Cedex

Les découvertes successives de l'effet Josephson et de l'effet Hall quantique ont permis de réaliser des étalons de tension et de résistance électrique incomparablement plus stables que les étalons matériels classiques.

L'ancienne définition de l'ampère et la hiérarchie des unités électriques

De 1948 au 20 mai 2019, la définition de l'unité d'intensité du courant électrique (voir l'article de L. Julien, p. 12) s'appuyait sur la théorie de Maxwell et sur une expérience de pensée mettant en jeu deux fils, infiniment longs et infiniment fins, parcourus par un courant électrique. Ces fils subissent alors la force de Laplace sous l'effet du champ magnétique qu'ils créent autour d'eux (fig. 1). En imposant, dans la définition, la distance entre les fils et la valeur de la force exercée par unité de longueur, la perméabilité du vide μ_0 a été fixée implicitement à $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ exactement. Cette définition, la première à reposer sur une constante de la physique, fut une avancée importante dans l'uniformisation des unités électriques. Cependant, sa mise en œuvre expérimentale restait difficile. Jusque dans les années 1960, elle reposait sur différentes versions de la *balance de l'ampère*, où la force électromagnétique qui s'exerce entre deux bobines parcourues par un courant est comparée à la force gravitationnelle d'une masse connue. Les incertitudes de ces réalisations, liées en grande partie à la géométrie des bobines, sont restées limitées à quelques 10^{-6} .

De manière à réduire cette incertitude, il a fallu emprunter une autre voie, qui s'appuie sur la réalisation du farad à partir du mètre. A. Thompson et D. Lampard [1] ont en effet démontré que la valeur des capacités croisées par unité de longueur dans un système de quatre électrodes cylindriques, chacune de longueur infinie,

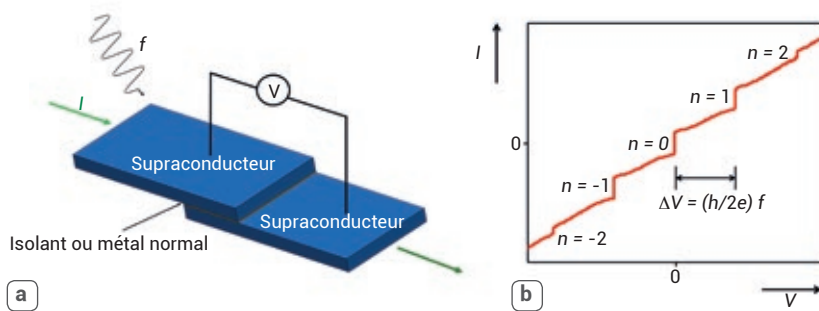


1. Illustration de l'ancienne définition de l'ampère. Le fil conducteur parcouru par le courant I_1 dans le champ magnétique B_2 créé par le courant I_2 , subit une force de Laplace perpendiculaire à I_1 et B_2 , et réciproquement : les deux fils s'attirent par la force F . L'ancienne définition fixait la force à $2 \times 10^{-7} \text{ N m}^{-1}$ pour des fils de longueur infinie, de section circulaire négligeable, distants de 1 m dans le vide et parcourus par un courant de 1 ampère. La nouvelle définition de l'ampère est liée à la charge élémentaire, e , fixée à $1,602176634 \times 10^{-19} \text{ A s}$.

n'était reliée qu'à la permittivité du vide ϵ_0 , cette dernière étant exacte depuis que la vitesse de la lumière c a été fixée en 1983 : $\mu_0 \epsilon_0 c^2 = 1$. Grâce au condensateur calculable de Thompson-Lampard, réaliser le farad revient donc à mesurer une longueur de manière précise, permettant d'atteindre une incertitude de quelques 10^{-8} . À partir du farad et de la seconde, il est possible de réaliser l'ohm en comparant une résistance à l'impédance de la capacité calculable. Le volt, lui, peut être déterminé à partir de la balance du volt, dans laquelle le poids d'une masse contrebalance la force électrostatique s'exerçant sur l'électrode mobile d'un condensateur soumis à une tension. De cette manière, des incertitudes de l'ordre de quelques 10^{-7} ont été atteintes. La réalisation de l'unité de base, l'ampère, est finalement obtenue de

manière indirecte avec une incertitude de quelques 10^{-7} , à partir de la combinaison de différentes réalisations des unités dérivées, parmi lesquelles l'ohm, le volt et le watt déterminé par la balance de Kibble (voir l'article de M. Thomas, p. 18).

De manière générale, les incertitudes des réalisations des unités électriques étaient limitées par le lien entre l'ampère et les unités mécaniques, *via* la définition de 1948. Pour aller au-delà, le changement de définition voté le 16 novembre 2018, qui permet de relier l'ampère au flux de charges élémentaires par unité de temps, était indispensable. Mais il n'a pu être envisagé qu'en se basant sur une représentation microscopique du transport électronique et grâce aux phénomènes quantiques utilisés en métrologie électrique.



E1. (a) Jonction Josephson soumise à un courant continu I et irradiée par une fréquence externe f .

(b) Caractéristique tension-courant d'une jonction Josephson SNS (supraconducteur-métal normal-supraconducteur) soumise à un rayonnement micro-onde de fréquence f et faisant apparaître les premières marches de tension constante correspondant à $n = 0, \pm 1, \pm 2$. Les marches sont séparées par une tension ΔV égale à $(h/2e)f$.

L'effet Josephson a été prédit par Brian Josephson en 1962 [2]. Cet effet, sur lequel reposent les étalons quantiques de tension, apparaît dans des microstructures, appelées jonctions Josephson (fig. E1a), où deux supraconducteurs sont séparés par une couche mince de matériau non supraconducteur (isolant ou métal). Dans une telle structure, un courant supraconducteur peut circuler sans tension appliquée entre les bornes supraconductrices (effet Josephson continu). Mais, dès lors qu'il existe une tension continue V à ses bornes, le courant supraconducteur dans la jonction oscille à la fréquence Josephson, $f_J = 2eV/h$ (effet Josephson alternatif). La jonction Josephson apparaît donc comme un convertisseur fréquence-tension de précision fondamentale, car ces deux grandeurs ne sont reliées que par la charge élémentaire e et la constante de Planck h .

De manière à utiliser cet effet pour un étalon de tension, la jonction est soumise simultanément à un courant continu et à une onde électromagnétique de fréquence f (fig. E1a). Dans ce cas, une tension dépendant du temps se superpose à la tension continue aux bornes de la jonction. La fréquence du courant supraconducteur est modulée et le courant oscille de façon complexe. Lorsque la fréquence Josephson f_J (correspondant à la tension moyenne V) est égale à un multiple entier n de la fréquence de l'onde électromagnétique, le courant supraconducteur possède une composante continue non nulle, ce qui se révèle dans la caractéristique courant-tension de la jonction par des marches de tension constante, appelées marches de Shapiro, apparaissant à $V_n = n (h/2e) f$ (fig. E1b). La largeur et la position de ces marches de tension sur l'axe des courants dépendent des caractéristiques physiques de la jonction et de la puissance micro-onde ; cependant, la valeur de la tension ne dépend que de la fréquence externe et de constantes fondamentales, au travers de la constante de Josephson K_J , théoriquement égale à $2e/h$. La fréquence pouvant être générée avec grande exactitude grâce aux horloges atomiques, les jonctions Josephson sont utilisées comme les références de tension pour la conservation du volt.

La révolution quantique vers le nouveau SI

Les découvertes successives de deux effets quantiques, l'effet Josephson en 1962 [2] et l'effet Hall quantique en 1980 [3] (voir les encadrés 1 et 2), ont très rapidement été exploitées pour réaliser des étalons de tension et de résistance qui se sont révélés incomparablement plus stables que l'ensemble des étalons matériels qui servaient pour la conservation du volt et de l'ohm, telles que les piles Weston et les résistances bobinées.

Dans ces deux effets quantiques, sous certaines conditions, la tension et la résistance acquièrent des valeurs quantifiées (voir les encadrés). Dans le cas de l'effet Josephson, les tensions quantifiées sont directement proportionnelles à la fréquence d'une onde électromagnétique par l'intermédiaire de la constante de Josephson K_J . Dans le cas de l'effet Hall quantique, les plateaux de résistance correspondent à des sous-multiples de la constante de von Klitzing, R_K . L'universalité et la reproductibilité des constantes phénoménologiques K_J et R_K ont été démontrées en comparant différents matériaux avec des incertitudes extrêmement faibles ($< 10^{-10}$). Plusieurs travaux théoriques (voir les références dans l'article de revue de W. Poirier *et al.* [4]) ont justifié leur lien aux constantes e et h et leur caractère universel.

Depuis 1990, les deux effets quantiques sont utilisés dans les laboratoires de métrologie pour la conservation du volt et de l'ohm avec des valeurs sans incertitude K_{J-90} et R_{K-90} adoptées par convention, l'indice 90 se référant à l'année de mise en œuvre. Ces valeurs ont été introduites pour résoudre le dilemme entre la supériorité des phénomènes quantiques en terme de reproductibilité et les incertitudes élevées de 4×10^{-7} et de 1×10^{-7} attribuées à K_J et R_K dans le SI à cette époque-là. La mise en place de cette solution, qui découple assez largement les unités électriques du SI des expériences de mécanique, a eu un impact très positif sur la traçabilité des mesures électriques. D'un point de vue pratique, l'inconvénient le plus notable était l'obligation de réassigner leurs incertitudes à ces valeurs lors d'expériences impliquant des grandeurs au-delà du domaine électrique. La situation des unités électriques était avant tout inconfortable du point de vue de la cohérence d'ensemble du SI. C'est pourquoi d'énormes efforts

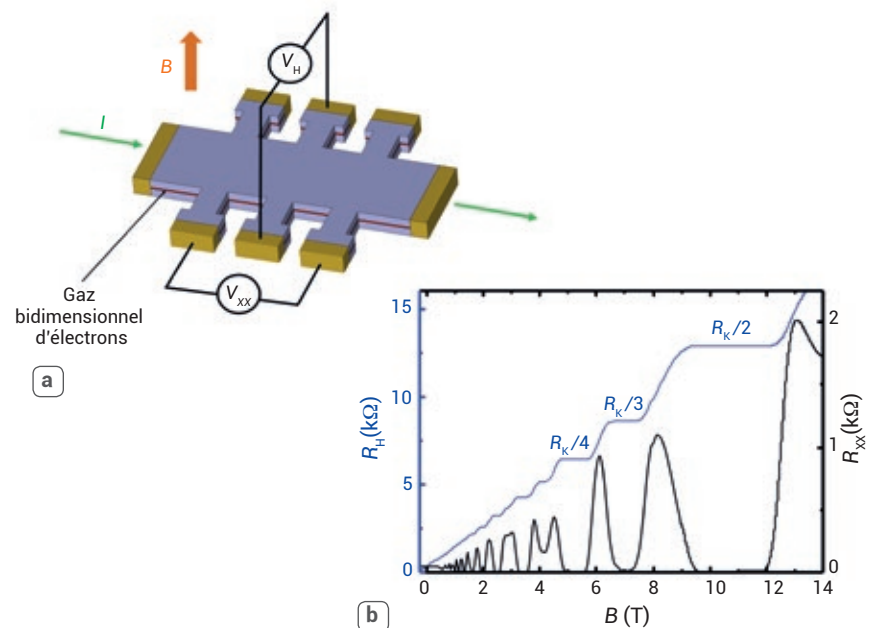
expérimentaux ont été fournis pendant vingt ans pour déterminer R_K et K_J avec les incertitudes les plus faibles possibles. Cela a permis d'écarter l'hypothèse d'éventuelles corrections à l'expression des constantes K_J et R_K en fonction de e et de h , $K_J = 2e/h$ et $R_K = h/e^2$, avec un niveau d'incertitude acceptable. De ce fait, depuis le 20 mai 2019, ces relations sont considérées comme exactes. D'autre part, les valeurs numériques sont déduites de valeurs fixées de e et de h . L'effet Josephson et l'effet Hall quantique sont donc devenus des réalisations SI du volt et de l'ohm, et l'incohérence du système est résolue. Les nouvelles valeurs des constantes $K_J = 483597,848416984$ GHz/V et $R_K = 25812,8074593045$ Ω s'écartent respectivement en valeurs relatives de -1×10^{-7} et de $+1,8 \times 10^{-8}$ des valeurs conventionnelles fixées en 1990. Bien que ces écarts soient significatifs par rapport aux incertitudes des mises en œuvre de ces étalons quantiques, ces changements sont à peine visibles dans les étalonnages réalisés dans les laboratoires nationaux de métrologie lorsqu'on tient compte de la stabilité des étalons secondaires.

La définition de l'ampère liée à la charge élémentaire permet également de nouvelles mises en pratique, comme l'application directe de la loi d'Ohm à partir des étalons quantiques de tension et de résistance. Une telle mise en œuvre, impliquant un amplificateur supraconducteur de très grande exactitude, permet aujourd'hui d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 10^{-8} , soit un ordre de grandeur plus faible qu'avec l'ancienne définition [5]. Il est par ailleurs possible d'envisager le développement d'un étalon quantique de courant basé sur des dispositifs mono-électroniques qui permettent de synchroniser, à une fréquence externe, le passage des électrons un par un dans des dispositifs de taille nanométrique à très basse température. Cependant, ces étalons ne peuvent fournir pour le moment que des courants de l'ordre de la centaine de picoampères, limitant les incertitudes à quelques 10^{-7} .

Plus généralement, les étalons quantiques serviront pour les mises en pratique de nombreuses unités comme le farad et le kilogramme (*via* la balance de Kibble), avec des incertitudes de l'ordre de 10^{-8} . Au-delà du domaine électrique, la nouvelle définition du kelvin fondée sur la constante

L'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique a été découvert en 1980 par Klaus von Klitzing [3], qui envisagea aussitôt son application à la métrologie. Dans une barre de Hall, fabriquée à partir d'un gaz d'électrons bidimensionnel, comme celui formé dans le graphène ou à l'interface d'une hétérostructure semi-conductrice GaAs/AlGaAs (fig. E2a), l'effet Hall quantique se signale à très basse température et à très fort champ magnétique par la quantification de la résistance transverse ou résistance de Hall, $R_H = R_K/i$, à des sous-multiples entiers i de la constante de Klitzing R_K , théoriquement égale à h/e^2 . Simultanément, la résistance longitudinale R_{xx} s'annule, révélant l'absence de dissipation dans le gaz bidimensionnel (fig. E2b). Cet effet quantique macroscopique repose sur la quantification du mouvement cyclotron des électrons et de la densité d'états en niveaux discrets sous champ magnétique. Le transport électronique est lié à un nombre entier d'états unidimensionnels non dissipatifs.



E2. (a) Représentation schématique d'une barre de Hall réalisée dans un gaz d'électrons bidimensionnel obtenu dans GaAs/AlGaAs. Lorsqu'un courant I est imposé dans la barre selon la grande longueur, la résistance longitudinale R_{xx} est définie comme le rapport de la chute de tension V_{xx} au courant, et la résistance de Hall R_H comme le rapport de la tension V_H au courant. L'effet Hall quantique se manifeste lorsque le gaz d'électrons est soumis à un champ magnétique perpendiculaire B .

(b) Courbes de magnétorésistance typiques mesurées dans une barre de Hall en GaAs/AlGaAs, à basse température et jusqu'à fort champ magnétique. R_H est la résistance de Hall et R_{xx} est la résistance longitudinale (par carré). Les plateaux formés par R_H et la faible valeur de R_{xx} aux mêmes champs magnétiques B que ces plateaux sont les manifestations de l'effet Hall quantique

de Boltzmann k peut également être mise en œuvre en exploitant les fluctuations de tension dans un conducteur, dues à l'agitation thermique des électrons (bruit Johnson-Nyquist d'une résistance relié à k). La mesure de l'amplitude de ces fluctuations avec un étalon à effet Josephson permet de déterminer la température à partir de e , de h et de k .

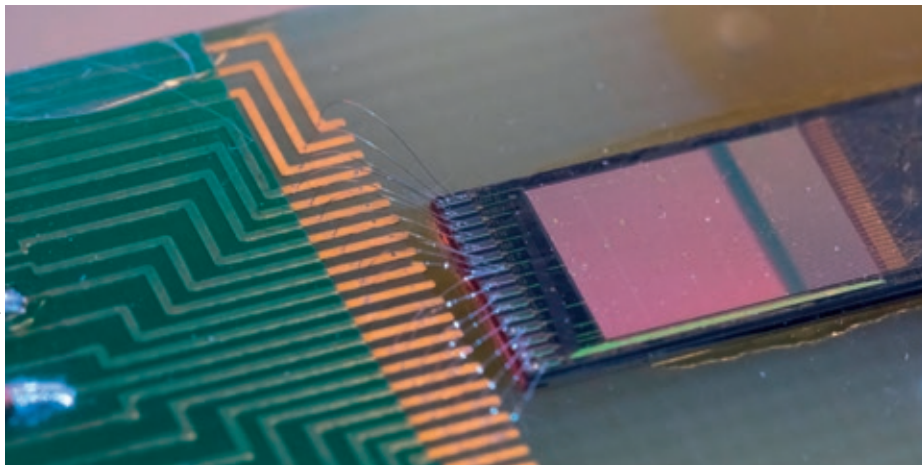
Étalons quantiques et perspectives

Les étalons quantiques utilisés actuellement pour la conservation des unités électriques sont issus de grands progrès technologiques et sont des dispositifs assez éloignés des systèmes utilisés pour les premières démonstrations expérimentales des effets.

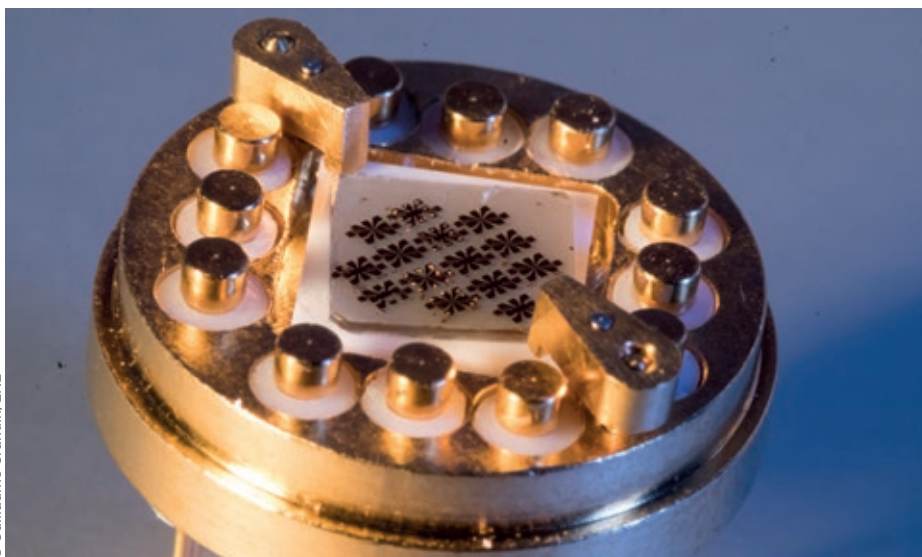
Les étalons de tension Josephson consistent ainsi en la mise en série de centaines de milliers de jonctions Josephson (fig. 2). Ce nombre élevé est nécessaire pour atteindre des tensions de plus de 10 volts, d'intérêt pour les utilisateurs, car une seule jonction fonctionnant à 10 GHz ne génère que 20 μV . Ces étalons s'appuient sur des circuits supraconducteurs complexes, superposant tensions continues et micro-ondes et nécessitant une grande homogénéité des paramètres des jonctions Josephson. Les étalons de tension Josephson programmables sont des réseaux divisés en segments, chacun d'eux étant commandé par une source de polarisation en courant indépendante. Ils se comportent comme des convertisseurs numériques-analogiques. Ils permettent d'automatiser les applications en tension continue et de générer des tensions alternatives dans la gamme du kilohertz. D'autres réseaux, pilotés par des impulsions de courte durée (inférieure à la nanoseconde), permettent de générer des tensions alternatives jusqu'au mégahertz. Il existe, d'ores et déjà, des systèmes commerciaux qui autorisent une plus large diffusion vers les utilisateurs.

Les étalons de résistance, quant à eux, ont connu un renouveau ces dernières années avec un nouveau matériau, le graphène (fig. 3). Cette monocouche d'atomes de carbone organisés en réseau hexagonal de type nid d'abeille se révèle être très intéressante, car l'effet Hall quantique y est très robuste ; il a été notamment observé jusqu'à température ambiante. Avec ce matériau, il est possible de développer un étalon quantique de résistance quantifié aux meilleures exactitudes à plus faible champ magnétique, et avec des températures et des courants de mesure plus élevés que dans le cas du GaAs [6]. Les conditions de mise en œuvre sont alors beaucoup plus simples, ce qui facilite la dissémination de l'unité de résistance. Par ailleurs, des découvertes récentes, comme l'effet Hall quantique anormal dans des isolants topologiques, permettent d'envisager l'effet Hall quantique à champ nul à long terme.

Toutes ces avancées ouvrent la perspective de réaliser l'ensemble des grandeurs électriques sur de larges gammes de valeurs et de fréquences, dans des conditions expérimentales se simplifiant, et ce, directement à partir des étalons quantiques reliés à e et h . ■



2. Photographie d'un étalon de tension Josephson programmable 1 V contenant 8192 jonctions Josephson, fabriqué par le laboratoire national de métrologie allemand PTB. Le circuit supraconducteur où se trouvent les jonctions Josephson est à droite de l'image. Il est connecté à un circuit imprimé (à gauche de l'image) par des fils de soudure.



3. Quelques barres de Hall à base de graphène sur SiC, avec des contacts en Ti/Au. La plaquette est montée sur un porte-échantillon dédié aux mesures électriques.

Références

- 1• A.M. Thompson et D.G. Lampard, "A new theorem in electrostatics with applications to calculable standards of capacitance", *Nature* **177** (1956) 888-890.
- 2• B.D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunneling", *Phys. Rev. Lett.* **1** (1962) 251-253.
- 3• K. von Klitzing, G. Dorda et M. Pepper, "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance", *Phys. Rev. Lett.* **45** (1980) 494.
- 4• W. Poirier *et al.*, "The ampere and the electrical units in the quantum era", *Comptes Rendus Physique* **20** (2019), <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.02.003>.
- 5• J. Brun-Picard *et al.*, "Practical quantum realization of the ampere from the elementary charge", *Phys. Rev. X* **8** (2016) 041051.
- 6• R. Ribeiro-Palau *et al.*, "Quantum Hall resistance standard in graphene devices under relaxed experimental conditions", *Nat. Nanotechnol.* **10** (2015) 965-971.

Le kelvin révisé et la constante de Boltzmann

Laurent Pitre (laurent.pitre@cnam.fr) et Mohamed Sadli (mohamed.sadli@cnam.fr)
Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam, 61 rue du Landy, 93210 Saint-Denis

Depuis le 20 mai 2019, l'unité de température thermodynamique, le kelvin, ne repose plus sur une valeur exacte de la température du point triple de l'eau, mais sur une valeur fixe de la constante de Boltzmann.

En 2018, le système international d'unités, ou Système international (SI), connaissait sa plus grande révolution depuis la mise en place du système de mètres-kilogrammes-secondes (MKS) avec la Convention du mètre de 1875. Désormais, les définitions de cinq des sept unités de base – le mètre, la seconde, le kilogramme, l'ampère et le kelvin – sont formulées à partir des constantes fondamentales dont les valeurs sont fixées, indéfiniment (sauf si un grand bouleversement dans les lois de la physique intervient). En particulier, l'unité de température thermodynamique, le kelvin, ne repose plus sur une valeur exacte de la température du point triple de l'eau (273,16 K) mais plutôt sur une valeur fixe de la constante de Boltzmann k ($1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$). Redéfinir le kelvin à partir de la constante de Boltzmann k , reliant la température thermodynamique au quantum d'énergie d'agitation thermique, va avoir comme principal avantage de ne favoriser aucune température ni aucune méthode pour sa mesure, alors qu'avec la précédente définition, il était toujours nécessaire de référer toute mesure de température (des très basses températures en dessous de 20 K à la pyrométrie au-dessus de 1000 °C) à la température du point triple de l'eau, 273,16 K.

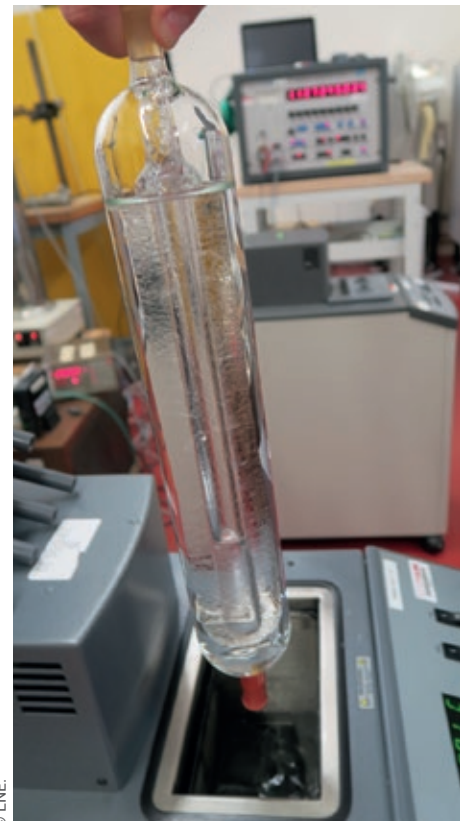
Un peu d'histoire

Historiquement, la température a été l'une des premières grandeurs physiques qu'on a cherché à mesurer pendant la Renaissance, à la fin du XVI^e siècle. Les

premiers thermomètres traçables et interchangeable ont été des thermomètres à dilatation d'alcool liés par construction au point de glace (aujourd'hui 0 °C). Ces thermomètres, très en avance sur leur temps, ont été développés par Torricelli et le duc Ferdinand II de Médicis [1] en 1650 (un siècle avant Celsius), suite au besoin de créer les premières stations météorologiques, établies aux alentours de la ville de Florence entre 1650 et 1665.

Alors que le besoin de connaître la température s'est exprimé si tôt et que la nature intensive de cette grandeur a dicté la nécessité d'une échelle constituée de repères répétables et pratiques, ce n'est que deux siècles plus tard que William Thomson (anobli ensuite et devenu Lord Kelvin) va concevoir une échelle qui permettra de décrire correctement la température dans les relations de la physique. En effet, les relations de la thermodynamique et de la physique statistique n'ont de sens que si la température est nulle lorsque les atomes et les molécules sont au repos absolu. En son honneur, l'unité de température va avoir comme nom le kelvin.

Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que la communauté scientifique a commencé à travailler sur une échelle internationale de température définissant des repères de température sur tout le domaine, ainsi que sur des instruments (thermomètres) permettant d'interpoler entre ou d'extrapoler au-delà de ces repères, appelés points fixes. La température dans l'échelle devait être



1. Cellule point triple de l'eau, ancienne matérialisation de l'unité de température, désormais un point fixe comme les autres.

aussi proche que possible de la température thermodynamique, et c'est cette quête d'équivalence, voire d'égalité, qui a motivé les actualisations de l'échelle de température. Celles-ci se sont succédé jusqu'en 1990, à une cadence moyenne d'une vingtaine d'années et avec toujours le souci de garantir autant que possible une continuité de l'unité et des mesures.

Ainsi, pour redéfinir l'unité de température tout en assurant une transition douce, la mesure de la constante de Boltzmann, k , devait se faire au point triple de l'eau [2] (fig. 1).

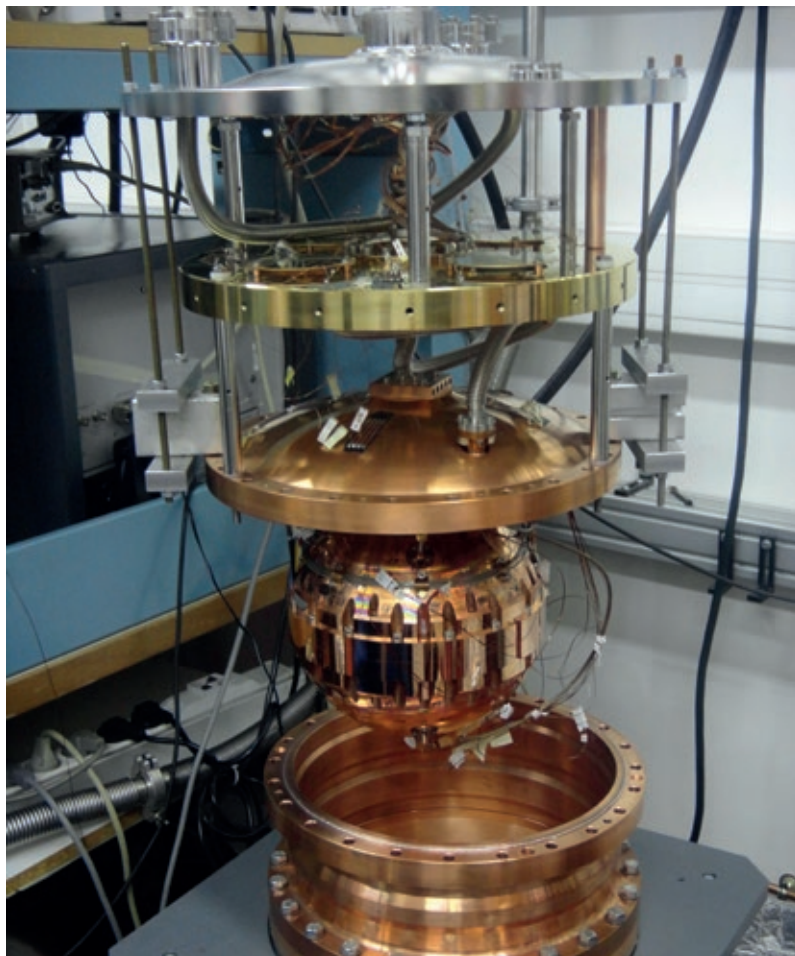
Détermination expérimentale de la constante de Boltzmann

La détermination expérimentale de k avec l'incertitude requise pour que la redéfinition n'altère pas notablement l'exactitude de la connaissance de la température, soit typiquement de l'ordre de 0,273 mK ou 10^{-6} en valeur relative, n'est pas chose aisée.

Des chercheurs du monde entier se sont attelés à cette tâche durant les dix dernières années en exploitant des lois de la physique dans lesquelles intervient soit le produit kT , soit le produit RT où $R = kN_A$ est la constante molaire des gaz (constante des gaz parfaits) et N_A la constante d'Avogadro. Il est à noter que l'incertitude relative sur N_A en 2017 étant de $1,2 \times 10^{-8}$, elle était négligeable devant celle de k ; les précisions sur les déterminations expérimentales de k et R sont donc essentiellement équivalentes.

La thermométrie des gaz parfaits, basée sur l'équation d'état $pV = nRT$ où n est la concentration molaire en gaz par unité de volume, ne pouvait convenir pour cette mesure : en effet, il est impossible de mesurer n et le volume V au niveau d'exactitude requis. Il en était de même pour la loi d'Einstein sur le mouvement brownien et pour la loi de Curie décrivant l'aimantation d'un échantillon. La loi de Planck pour le rayonnement de corps noir ne pouvait pas non plus être utilisée pour mesurer k au niveau d'exactitude requis à la température du point triple de l'eau ; cette méthode, qui repose sur des mesures radiométriques absolues de la densité spectrale de luminance d'un corps noir, est bien mieux adaptée au domaine spectral visible et donc aux très hautes températures (au-delà de 1000 °C).

Plusieurs autres lois pouvaient être utilisées pour déterminer la valeur de k , telles que celles qui associent la température à la vitesse du son et à la masse molaire (thermométrie acoustique à gaz), à la constante diélectrique ou à l'indice de réfraction (thermométrie à gaz par mesure de la constante diélectrique), à la puissance de bruit électrique dans une largeur de bande donnée (thermométrie à bruit de Johnson) ou à la largeur spectrale d'une résonance d'absorption optique (thermométrie par mesure de l'élargissement Doppler). Notons que seules les trois premières méthodes étaient assez précises pour contribuer à la valeur qui a été fixée pour k [3].



© Laurent Pitre

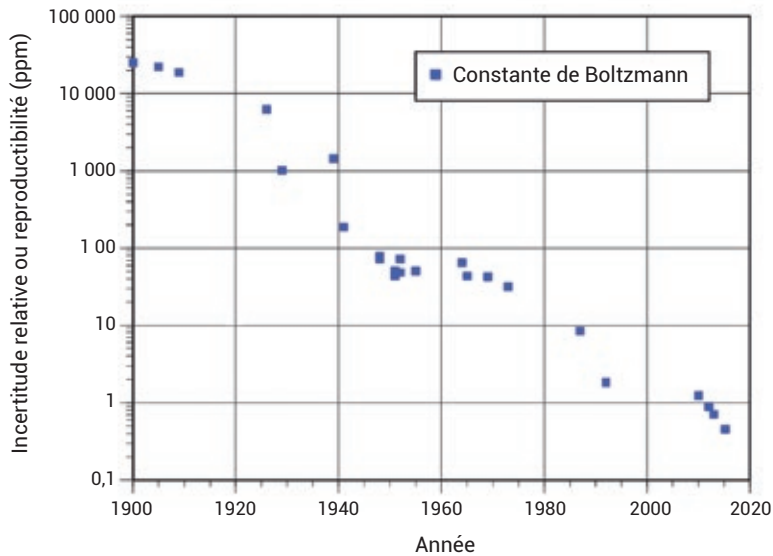
2. Résonateur sphérique utilisé par l'équipe du LNE-Cnam pour mesurer la constante de Boltzmann k par thermométrie acoustique. Le résonateur, dont le volume intérieur est de quelques litres, est rempli de gaz rare (hélium ou argon) et placé dans un cryostat. On mesure les fréquences acoustiques de ses modes d'oscillation radiale.

La mesure de k par thermométrie acoustique

La mesure de la constante de Boltzmann par voie acoustique, réalisée par notre équipe au LNE-Cnam, est basée sur le fait que la vitesse de propagation du son dans un gaz de composition connue (généralement un gaz rare tel que l'hélium ou l'argon) est fonction de la température et de la pression : c'est le principe de la thermométrie acoustique des gaz.

Atteindre la meilleure précision sur la mesure nécessite de prendre en compte les écarts par rapport au comportement du gaz idéal. Pour les gaz monoatomiques, où les capacités thermiques spécifiques à volume et pression constants sont indépendantes de la température, la vitesse acoustique u , extrapolée à pression nulle, est liée à la température thermodynamique T de manière simple : $u^2 = (5/3) RT / M$, où M est la masse molaire du gaz.

En pratique, la vitesse u est déduite des fréquences de résonance acoustiques du gaz dans un résonateur quasi sphérique dont le volume est de quelques litres. La figure 2 montre la photo d'un tel résonateur utilisé dans notre laboratoire, avant sa mise en place dans un cryostat. On mesure ces fréquences acoustiques pour des modes d'oscillation radiale, sous différentes pressions et à une température donnée. Les dimensions internes du résonateur sont mesurées par interférométrie optique, ce qui permet de relier les fréquences à la vitesse u . Cette vitesse est extrapolée à pression nulle ; on en déduit le produit RT et donc la constante de Boltzmann connaissant la température, la masse molaire du gaz, ainsi que la constante d'Avogadro. Toutes ces données sont suffisamment précises pour obtenir une incertitude globale sur k correspondant à l'objectif assigné, c'est-à-dire inférieure à 10^{-6} en valeur relative.



3. Évolution de l'incertitude relative de la mesure de la constante de Boltzmann au cours du temps. Le dernier point correspond à la mesure du LNE-Cnam : c'est la mesure la plus précise de cette constante, qui ne sera désormais plus mesurée.

Notre dernière mesure de k [4], avec une incertitude de $4,8 \times 10^{-7}$, a été la plus précise parmi celles prises en compte dans l'ajustement des constantes réalisé par le CODATA en 2017 [3]. Les principales composantes de l'incertitude étaient constituées de cinq éléments presque égaux. Cela signifie que la thermométrie acoustique des gaz a atteint une limite qui ne sera probablement pas dépassée avant de nombreuses années. En effet, pour

réduire encore cette incertitude, il faudrait travailler en parallèle pour réduire toutes les contributions de même niveau, ce qui est très difficile [5].

Cette mesure a joué un rôle important dans le choix de la valeur de la constante de Boltzmann qui a été fait pour redéfinir le kelvin. Elle a mis un point final à une longue série de mesures dont les premières datent des géants de la physique moderne (Planck, Einstein, Perrin), avec une incer-

Références

- 1• D. Camuffo et C. Bertolin, "The earliest temperature observations in the world: the Medici Network (1654–1670)", *Climatic Change* **111** (2012) 335–363.
- 2• L. Pitre, « Le kelvin, de l'artéfact à la constante de Boltzmann », conférence grand public dans le cadre des « jeudis de la mesure », 4 octobre 2018, LNE Paris. www.youtube.com/watch?v=OA1NMv2OCqQ
- 3• P.J. Mohr et al., "Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment", *Metrologia* **55** (2018) 125–146.
- 4• L. Pitre et al., "New measurement of the Boltzmann constant k by acoustic thermometry of helium-4 gas", *Metrologia* **54** (2017) 856–873.
- 5• L. Pitre et al., "Determinations of the Boltzmann constant", à paraître dans *C.R. Physique* (2019), DOI : 10.1016/j.crhy.2018.11.007.

titude de l'ordre de 10^{-1} qui n'a cessé de diminuer régulièrement jusqu'à aujourd'hui (fig. 3). D'un point de vue concret, les méthodes les plus à même de s'imposer pour mettre en pratique à l'avenir la nouvelle définition du kelvin seront les mesures de température thermodynamique par voie acoustique, telles que celle décrite ici, jusqu'à 500 °C, et par voie radiométrique, par des mesures reliées aux grandeurs électriques, au-dessus de 500 °C. ■

Quelques vidéos consacrées au nouveau Système international d'unités

De mai à novembre 2018, le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) a organisé à Paris un cycle de sept conférences dédiées à chacune des unités du Système international (SI).

Sur le thème « Évolution des unités de mesure : une révolution ? », ces conférences ont été l'occasion de présenter ces sept unités de mesure : leur histoire, leur nouvelle définition et les implications de ces redéfinitions.

Animées par les chercheurs du LNE et des laboratoires du Réseau national de la métrologie française, les vidéos de ces conférences (d'environ une heure chacune) peuvent être retrouvées sur la chaîne YouTube LNE : www.lne.fr/index.php/fr/actualites/videos-conferences-SI-unites-mesure

- « Le mètre, l'aventure continue... » - Marc Himbert
- « La candela, une touche d'humain dans les unités de mesure » - Gaël Obein
- « La mole : pourquoi une unité spécifique à la chimie ? » - Sophie Vaslin-Reimann
- « La seconde : vers une redéfinition » - Sébastien Bize
- « Le kelvin : de l'artéfact à la constante de Boltzmann » - Laurent Pitre
- « Le kilogramme : de l'artéfact à la constante de Planck » - Matthieu Thomas
- « L'ampère ou les unités électriques à l'ère quantique » - Wilfrid Poirier

On consultera également avec intérêt la vidéo de la séance publique du 16 novembre 2018 à Versailles, lors de la 26^e Conférence générale des poids et mesures (CGPM), qui s'est terminée par le vote unanime des représentants de 54 États en faveur du projet de résolution « Sur la révision du Système international d'unités (SI) » :

www.youtube.com/watch?v=qA67T7FPBME .

Cette séance comportait quatre conférences scientifiques :

- Klaus von Klitzing : "The quantum Hall effect and the revised SI"
- Jean-Philippe Uzan : "The role of the Planck constant in physics"
- Jun Ye : "Optical atomic clocks – opening new perspectives on the quantum world"
- Bill Phillips : "Measuring with fundamental constants; how the revised SI will work"