

pour effacer les cartes bancaires. Au centre de la pièce, au premier étage, se tient une colonne comportant à sa base un aimant supraconducteur – refroidi avec de l'hélium liquide lorsqu'il est en fonctionnement.

La balance est au deuxième étage. Elle est composée d'une roue d'aluminium large de 50 centimètres montée verticalement avec des plateaux de balance suspendus à des fils de chaque côté (*voir l'encadré page ci-contre*). Un plateau supporte une masse test. Sous ce plateau est suspendue une bobine, un enroulement de fil conducteur, plongée dans le champ magnétique de l'aimant supraconducteur du premier étage. Le plateau de l'autre côté contient un contrepoids et un moteur électrique.

La balance fonctionne selon deux modes complémentaires, nécessaires pour calculer la constante de Planck à partir de la masse.

Le mode statique consiste à équilibrer le poids de la masse test grâce à la force dite de Laplace qu'exerce le champ magnétique sur la bobine parcourue par un courant électrique, sous le plateau.

Dans le mode dynamique, on retire la masse test du plateau. On déplace la bobine à vitesse constante dans le champ magnétique, grâce au moteur situé sous l'autre plateau. Une tension apparaît entre les deux extrémités du fil de la bobine.

L'intensité du courant nécessaire pour équilibrer la balance en mode statique et la tension obtenue en mode dynamique permettent, *via* des formules décrivant les phénomènes quantiques mis en œuvre dans la mesure de ces deux grandeurs, de remonter à la constante de Planck. Ainsi, en partant d'une masse égale à exactement un kilogramme, la balance du watt permet de déterminer la constante de Planck. À l'inverse, une fois la valeur de la constante de Planck fixée, on peut se servir de la balance pour mesurer n'importe quelle masse sans que cela nécessite un étalon de masse matériel.

Pour réaliser des mesures précises, Stephan Schlamminger et ses collègues doivent tenir compte des fluctuations locales de la pression de l'air et de l'accélération de pesanteur. La précession de la Terre et les marées doivent aussi être considérées. « Si nous n'effectuons pas les corrections liées aux marées », explique le métrologue, « l'erreur serait alors de 100 pour 1 milliard. »

Malgré la complexité de la machine, le chercheur a souvent l'impression d'utiliser un dispositif d'un autre temps : quand son équipe mesurait la constante de Planck, il

fallait ouvrir ou fermer des soupapes dans un ordre précis, et surveiller constamment la pression dans les réservoirs d'hélium. « Nous étions comme aux manettes d'une locomotive, ajoute le chercheur, et pourtant nous étions en train d'évaluer des quantités relevant de la mécanique quantique. »

La mutation quantique du kilogramme

La suite des opérations va dépendre des résultats des mesures effectuées en 2016, lorsque les différents étalons nationaux auront été comparés. Au moins trois des cinq étalons participants doivent avoir une valeur de masse chez eux qui est cohérente avec la masse étalonnée par rapport au Grand K, à moins de 50 microgrammes près, suivant les exigences du BIPM. Une fois les résultats publiés, l'opération de redéfinition débutera vraiment.

Si tout va bien, le kilogramme sera alors redéfini à partir de la constante de Planck. Le BIPM a fixé des contraintes sévères sur cette redéfinition : toutes les mesures de la constante de Planck effectuées par les participants doivent être affectées d'une incertitude inférieure à 50 pour 1 milliard et au moins un dispositif doit avoir une précision meilleure que 20 pour 1 milliard, valeur que l'équipe canadienne a déjà atteinte. Et pour que la définition soit effective en 2018, toutes les mesures de la constante de Planck doivent être acceptées pour publication au 1^{er} juillet 2017.

Et le Grand K ? Il restera dans son coffre-fort. Au vu de la complexité des balances du watt, les étalons matériels du kilogramme ne sont pas près de disparaître. Plutôt que d'utiliser les balances du watt, les laboratoires de métrologie continueront d'utiliser des étalons dans leur travail quotidien. Mais ces étalons seront calibrés à partir de balances du watt et non du Grand K.

Est-ce la fin de l'histoire ? Avons-nous maintenant la définition universelle du kilogramme « à tous les temps, à tous les peuples » dont rêvaient les savants de la Révolution ? Michael Stock réserve son jugement. « L'un de mes prédécesseurs, lauréat du prix Nobel, Charles Édouard Guillaume, pensait que l'étalon actuel perdurerait 10 000 ans. Cet excès d'optimisme m'amène à être prudent. Je ne sais pas s'il s'agit là de l'ultime redéfinition du kilogramme. Elle sera acceptable pour un temps, mais peut-être pas pour 10 000 ans. » ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Thomas, *Détermination de la constante de Planck au moyen d'une balance du watt*, thèse de doctorat, CNAM, 2015.

F. L. S. Chao *et al.*, *A LEGO Watt balance : An apparatus to determine a mass based on the new SI*, *American Journal of Physics*, vol. 83(11), pp. 913-922, 2015.

M. Stock, *Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram*, *Metrologia*, vol. 50(1), 2013.

I. Robinson, *Redéfinir le kilogramme*, *Pour la Science*, n° 353, mars 2007.

« Le nouveau kilogramme sera plus pratique »

À partir de 2018, le kilogramme sera défini à partir de la constante de Planck et non d'un cylindre de platine conservé dans un coffre-fort près de Paris. Richard Davis nous explique pourquoi cette nouvelle définition sera plus fiable et, surtout, plus pratique d'utilisation.



Richard DAVIS est ancien directeur du département responsable de la masse au BIPM (Bureau international des poids et mesures), à Sèvres, près de Paris.

POUR LA SCIENCE

Quels sont les inconvénients du Grand K, le prototype étalon du kilogramme ?

RICHARD DAVIS : Le Grand K est utilisé depuis 1889 comme référence. Il s'agit d'un cylindre de platine iridié conservé sous vide sous une triple cloche pour le protéger de la poussière. Pour s'assurer que sa masse ne varie pas, elle est comparée à celle de six « témoins », des cylindres identiques au Grand K, conservés dans le même coffre-fort.

Depuis 1889, la masse des témoins a augmenté de 50 microgrammes par rapport à celle du Grand K. Comme cette différence est relative, il est difficile de conclure si le Grand K a perdu de la masse, si les témoins en ont gagné, ou, pire, si tous les cylindres ont pris du poids et que nous ne mesurons ici qu'un détail de cette évolution.

Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer cette déviation. Par exemple, si un gaz prisonnier du platine du Grand K s'en échappe au fur et à mesure, celui-ci perdrait de la masse. Mais un tel gaz n'a pas été décelé. Nous n'avons pas d'explication satisfaisante pour l'instant.

Du fait du manque de fiabilité de l'étalon, les métrologues ont décidé de changer de référence.

PLS

La nouvelle définition se veut donc plus fiable, plus précise et plus pratique ?

R. D. : Absolument. La nouvelle définition repose sur la constante de Planck, qui apparaît dans la théorie quantique. Cette constante h est reliée notamment à l'énergie d'un photon: $E = h\nu$, où ν est la fréquence lumineuse. Et comme on peut aussi convertir la masse en énergie grâce à la formule d'Einstein $E = mc^2$, il est assez naturel de relier le kilogramme à la constante de Planck.

Le comité chargé de redéfinir les unités a la volonté de faire des choix pratiques pour les métrologues. Pour le kilogramme, nous ne serons plus tributaires d'un objet unique, le Grand K, d'autant peu accessible qu'il est rarement extrait de son coffre. Tout laboratoire équipé des bons instruments pourra étalonner une masse de façon fiable et précise à partir de la constante de Planck.

PLS

Concrètement, comment la nouvelle définition du kilogramme sera-t-elle mise en œuvre ?

R. D. : La future définition du kilogramme n'impose pas la méthode utilisée pour convertir la constante de Planck en une

masse. Contrairement au cas de la seconde, par exemple, définie à partir de la fréquence d'une radiation du césium 133 – alors que ce n'est peut-être plus aujourd'hui le moyen le plus précis pour mesurer le temps. En ce qui concerne la constante de Planck et le kilogramme, un des deux moyens les plus précis actuellement est la balance du watt. Celle-ci ressemble à une balance classique, mais on y compare la force de pesanteur à une force électromagnétique, du type force de Laplace, la mesure de cette dernière étant reliée à la constante de Planck.

Dans le processus de redéfinition du kilogramme, on utilise aujourd'hui les balances du watt pour mesurer la constante de Planck avec une bonne précision, afin d'en fixer ultérieurement la valeur une fois pour toutes. Ces expériences sont délicates, car beaucoup d'effets peuvent perturber les mesures.

Il existe deux balances très performantes en fonctionnement, celle du NIST, l'Institut américain des normes et technologies, et une autre au Canada, qui est pour l'instant la plus précise. D'autres sont en cours de développement : une au BIPM, une au Laboratoire national de métrologie et d'essais, à Trappes, une en Suisse et une en Corée. En Chine, les chercheurs développent une balance du joule, au principe équivalent.