

La balance du watt permet de relier la masse à la constante de Planck. En partant d'un étalon de un kilogramme, les métrologues fixeront définitivement la valeur de la constante de Planck. Dès lors, la balance pourra être utilisée pour mesurer n'importe quelle masse, indépendamment d'un étalon matériel qui pourrait s'altérer au cours du temps.

Ce dispositif, complexe, ressemble à une balance à deux plateaux. Sous l'un des plateaux (*celui de gauche, ci-dessous*) est suspendue une bobine horizontale constituée d'un fil conducteur de longueur L enroulé sur lui-même. Un système externe crée un champ magnétique B radial et horizontal où est plongée la bobine. La balance fonctionne selon deux modes complémentaires qui doivent être réalisés pour convertir la masse en constante de Planck et inversement.

En mode statique, on pose sur le plateau de gauche un étalon de un kilogramme; cette masse est notée m . Pour compenser le poids mg de l'étalon (où g est l'accélération de pesanteur locale), on ajuste le courant i qui parcourt la bobine et qui crée sur celle-ci une force de Laplace verticale, d'amplitude iBL . À l'équilibre, on obtient la relation $mg = iBL$. Un interféromètre laser permet de s'assurer qu'on a atteint la position d'équilibre.

En mode dynamique, on retire l'étalon. On déplace la bobine verticalement à vitesse constante v , toujours dans le champ magnétique B . Une tension apparaît aux bornes de la bobine, de la forme $U = vBL$. L'interféromètre laser assure que la vitesse est bien constante.

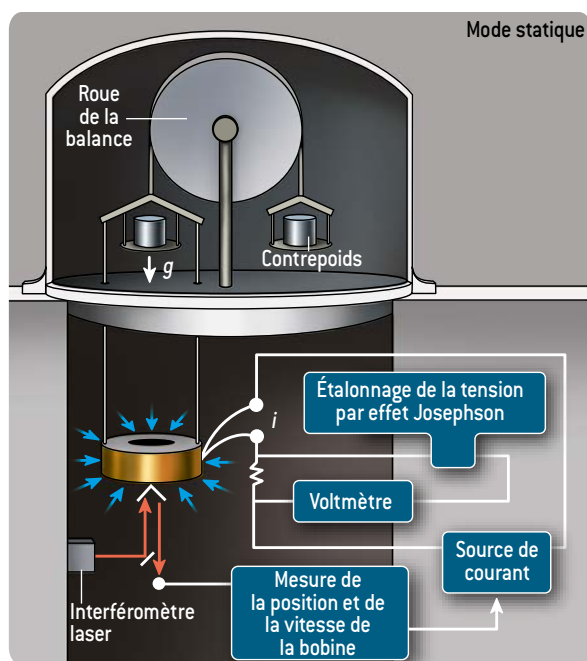
En combinant les mesures des deux modes, on élimine le produit BL , qu'il est difficile de mesurer avec précision. On obtient $mgv = Ui$. Chaque membre de cette égalité a la dimension d'une puissance (puissance mécanique, à gauche, et puissance électrique, à droite), d'où le nom de balance du watt (l'unité de la puissance). Pour relier la masse m à la constante de Planck h , on fait appel à deux phénomènes quantiques, l'effet Josephson et l'effet Hall quantique.

L'effet Josephson se traduit par la circulation d'un courant électrique entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche mince isolante. Dans les

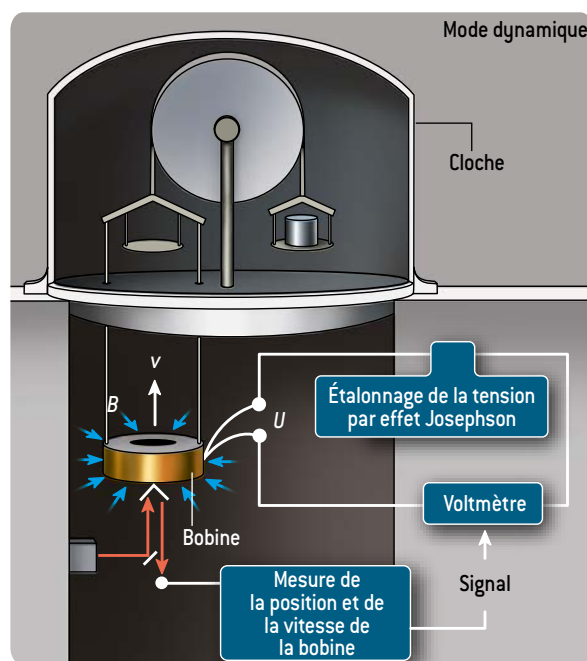
matériaux supraconducteurs, les électrons s'associent par paires, les paires de Cooper, et circulent sans résistance. Ces paires n'existent pas dans les isolants, mais elles passent ici d'un supraconducteur à l'autre par effet tunnel. En irradiant la jonction à une fréquence donnée f , la tension à travers la jonction dépend du courant des paires. On voit un « escalier » des tensions en fonction du courant appliqué, dont la différence entre deux marches successives est fh/e , où e est la charge de l'électron. Ce dispositif permet de déterminer la tension du mode dynamique de la balance du watt.

L'effet Hall classique correspond à la formation d'une tension perpendiculaire à la circulation d'un courant traversant un matériau baigné dans un champ magnétique. On définit une résistance Hall associée. Dans un semi-conducteur bidimensionnel et à basse température, cette résistance ne prend que certaines valeurs discrètes, qui dépendent de la constante de von Klitzing h/e^2 . Le courant du mode statique de la balance est déterminé en combinant l'effet Hall quantique et l'effet Josephson.

En fin de compte, la masse m est proportionnelle à la constante de Planck h .



LA BALANCE DU WATT permet des mesures de précision dont le résultat peut être faussé par de nombreux facteurs. Il est notamment crucial de limiter les vibrations du système. En outre, le dispositif est placé sous une cloche au sein duquel règne un vide poussé, afin



d'éviter des phénomènes tels que les mouvements de convection de l'air. Le champ magnétique externe peut exercer une force sur la masse test; il faut donc isoler celle-ci de ce champ créé par l'aimant supraconducteur, alors même que ce champ est intense.

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.