

Les unités à redéfinir

Unité : **Kilogramme (kg)**
Mesure de la masse

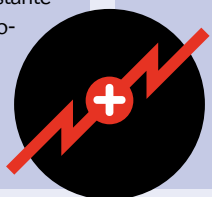
Définition actuelle (1889)

Le kilogramme est défini à partir du Grand K, un cylindre de platine iridié conservé au BIPM, à Sèvres.



Redéfinition proposée

Programmée pour 2018, la redéfinition du kilogramme le liera à la constante de Planck, qui est issue de la théorie quantique et qui précise, par exemple, la quantité d'énergie que porte un photon, la particule de lumière. En fixant la valeur numérique de la constante de Planck, les métrologues définiront le kilogramme.



Unité : **Ampère (A)**
Mesure du courant électrique

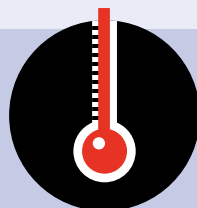
Définition actuelle (1946)

Un ampère est l'intensité d'un courant constant qui, s'il est maintenu dans deux conducteurs linéaires et parallèles, de longueurs infinies, de sections négligeables, et distants de 1 mètre dans le vide, produit entre ces deux conducteurs une force linéaire égale à 2×10^{-7} newton par mètre. En pratique, cette définition n'est pas reproductible de façon exacte en laboratoire.

Redéfinition proposée

En fixant la valeur numérique de la charge élémentaire e (environ $1,6 \times 10^{-19}$ ampère·seconde, ou coulomb), l'ampère sera redéfini comme un flux de charges élémentaires par seconde. On pourra aussi redéfinir les unités de tension et de résistance via

les constantes de Josephson et de von Klitzing, qui dépendent de e et de la constante de Planck.



Unité : **Kelvin (K)**
Mesure de la température

Définition actuelle (1967)

Le kelvin est égal à $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (où coexistent les phases solide, liquide et gazeuse). En pratique, cette définition crée des incertitudes importantes pour des températures basses (inférieures à 20 kelvins) ou élevées (supérieures à 1300 kelvins).

Redéfinition proposée

Le kelvin sera défini en fixant la valeur de la constante de Boltzmann, égale à environ $1,380 65 \times 10^{-23}$ joule par kelvin. La constante de Boltzmann relie l'énergie cinétique moyenne des molécules d'un gaz à la température du gaz.

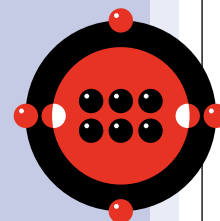
Unité : **Mole (mol)**
Mesure de la quantité d'une substance donnée

Définition actuelle (1971)

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires (atomes, molécules, etc.) qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. Ce nombre, égal à environ $6,022 14 \times 10^{23}$, définit le nombre d'Avogadro, qui dépend donc de la définition du kilogramme.

Redéfinition proposée

La mole sera définie en fixant la valeur du nombre d'Avogadro.



Pour effectuer la transition du kilogramme d'un étalon matériel à un étalon immatériel et quantique, le BIPM a défini une stratégie en deux étapes. Dans un premier temps, les laboratoires nationaux de métrologie de cinq pays ont utilisé la même valeur de la constante de Planck pour tester la cohérence du futur système métrologique. Ils ont pesé leurs étalons nationaux en fonction de cette valeur et les ont envoyés au BIPM pour comparer leurs résultats.

C'est précisément ce qui a été réalisé l'été dernier lorsque Jon Pratt a apporté les étalons américains au BIPM. Les résultats seront annoncés au cours de cette année 2017. S'ils sont satisfaisants, les équipes inverseront le processus et utiliseront chacune leur étalon national pour ajuster le plus

précisément leurs mesures de la constante de Planck. On fixera alors définitivement la valeur de cette dernière, et l'on définira le kilogramme à partir de cette valeur choisie.

Pour relier la constante de Planck à la masse, les métrologues utilisent deux approches très différentes et complémentaires, une boule de silicium (voir l'entretien avec Richard Davis, pages 70 et 71) et un dispositif complexe, nommé balance du watt (aussi nommée balance de Kibble en hommage à son inventeur, le physicien anglais Bryan Kibble, décédé en 2016). Les expériences utilisant les balances du watt sont si ardues qu'en 2012 la revue britannique *Nature* les a classées parmi les cinq projets les plus difficiles en physique, avec la recherche du boson de Higgs et celle des ondes gravitationnelles.

En mai dernier, j'ai accompagné Stephan Schlamminger, métrologue au NIST, sur le site hébergeant la plus ancienne des deux balances du watt du NIST. La plupart des mesures de la constante de Planck ont été effectuées sur cet appareil. La nouvelle balance, achevée en 2014, fonctionne globalement de la même façon.

Si l'extérieur du bâtiment fait penser à une ferme, l'intérieur vous plonge dans un autre monde, à l'image des romans de Jules Verne. Les murs sont protégés avec des plaques de cuivre jusqu'au deuxième étage et tout l'équipement est en laiton. Stephan Schlamminger explique que le fer est prosaïque, et que le cuivre et le laiton protègent les instruments des champs magnétiques extérieurs. Mais à l'intérieur, le champ magnétique produit est assez puissant

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.

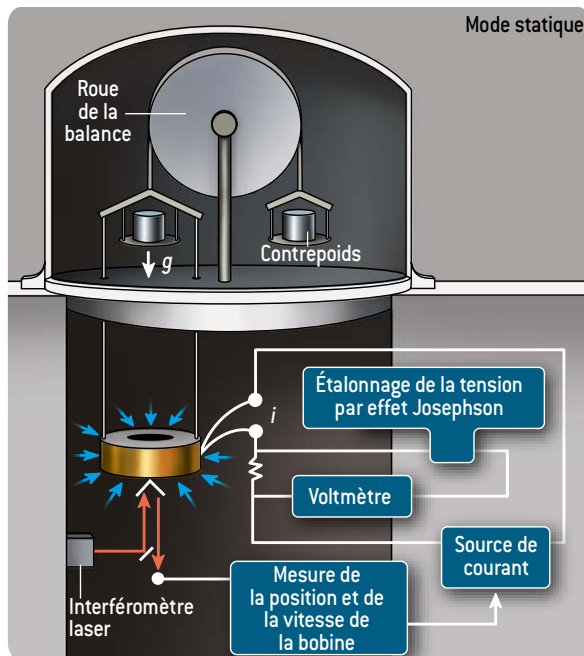
En combinant les mesures des deux modes, on élimine le produit BL , qu'il est difficile de mesurer avec précision. On obtient $mgv = Ui$. Chaque membre de cette égalité a la dimension d'une puissance (puissance mécanique, à gauche, et puissance électrique, à droite), d'où le nom de balance du watt (l'unité 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

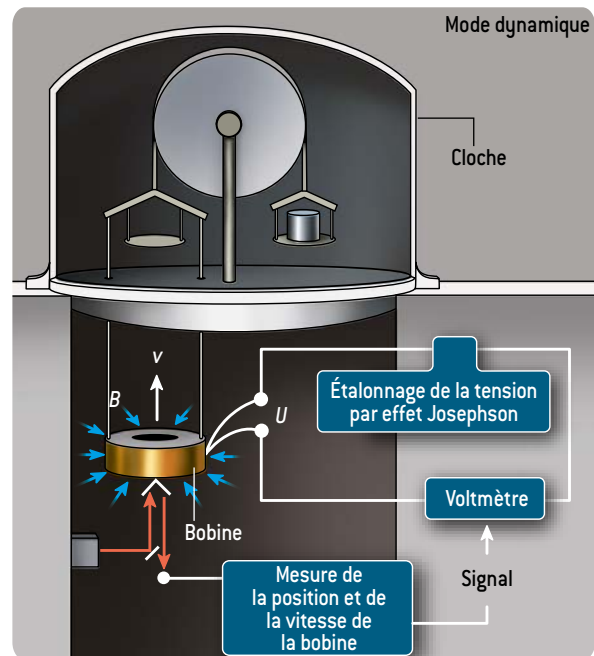
matériaux supraconducteurs, les électrons s'associent par paires, les paires de Cooper, et circulent sans résistance. Ces paires n'existent pas dans les isolants, mais elles passent ici d'un supraconducteur à l'autre par effet tunnel. En irradiant la jonction à une fréquence donnée f , la tension à travers 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.