

des futurs scénarios climatiques, le Réseau carbone du pergélisol vient de fournir le résultat suivant : au cours du XXI^e siècle, entre 5 et 15 % du carbone organique du pergélisol est susceptible d'être libéré, majoritairement sous forme de dioxyde de carbone.

La valeur médiane (10 %) de cette fourchette signifierait l'entrée dans l'atmosphère de 130 milliards à 160 milliards de tonnes de carbone supplémentaires par rapport à ce qui est prévu par ailleurs. Si elle est libérée essentiellement sous forme de dioxyde de carbone à un rythme constant pendant un siècle, cette quantité serait comparable à la quantité de carbone libérée dans le monde entier jusqu'ici par la déforestation et par les autres changements d'usage des sols, mais très inférieure aux rejets dus aux combustibles fossiles.

Le dégel accélérera le changement climatique

Le dégel du pergélisol accélérera donc le changement climatique par rapport à ce que l'on prévoyait en se fondant seulement sur les émissions liées aux activités humaines. De plus, les émissions dues à ce dégel se poursuivront sans doute au-delà du xxi^e siècle, et chaque tonne additionnelle de carbone organique libérée par l'Arctique coûtera à la société.

Réduire le dégel du pergélisol par des mesures locales en Arctique n'est pas réaliste. La seule solution est de limiter la combustion des carburants fossiles et à limiter la déforestation. Cela aura pour effet de ralentir le réchauffement global, donc le dégel des terres arctiques, ce qui donnera aux sociétés humaines davantage de temps pour s'adapter.

La fourchette citée plus haut – entre 5 et 15 % du carbone organique du pergélisol transformé en gaz à effet de serre – a été déterminée en 2015. Pour le moment, notre dispositif de recherche sur le pergélisol arctique est trop incomplet pour nous permettre de la réduire. Le déploiement de capteurs supplémentaires est nécessaire.

De nouveaux projets tels que l'Expérience sur écosystème de nouvelle génération (*Next Generation Ecosystem Experiments*) du Département de l'énergie des États-Unis ou encore l'Expérience sur la vulnérabilité arctique ou boréale (*Arctic-Boreal Vulnerability Experiment*) de la Nasa

sont en cours. Ils devraient nous aider à combler nos lacunes en matière de modélisation des écosystèmes et à étendre aux autres régions environnantes les résultats obtenus dans la station expérimentale d'Eight Miles Lake.

Une question importante à éclaircir est celle de la croissance de la végétation qui accompagnera la hausse des températures dans l'Arctique. Cette croissance pourrait-elle contrebalancer la libération de carbone par le pergélisol ? Les dernières simulations suggèrent que l'allongement de la période végétative, la présence de plus de nutriments dans les sols dégelés et l'apparition d'une végétation plus touffue pourraient compenser les émissions de carbone organique par le pergélisol durant le XXI^e siècle. Mais nos mesures à Eight Miles Lake contredisent ce pronostic, puisqu'elles indiquent une émission nette de carbone dans l'atmosphère à l'échelle de l'année.

Il sera aussi essentiel de simuler la façon dont le sol arctique s'affaisse lorsqu'il dégèle. En effet, quand un sol dégèle, la glace qu'il contenait se liquéfie et s'écoule, de sorte que des pans entiers de sol s'effondrent. Ce point n'est actuellement pas pris en compte dans les simulations à grande échelle des interactions entre le carbone du pergélisol et le climat.

Nous avons par exemple observé le phénomène à Eight Miles Lake quand nous y sommes revenus au printemps de 2016 : les chemins de bois que nous avions construits il y a dix ans, nos analyseurs de gaz et nos autres appareils avaient été déformés ou déséquilibrés. Des ondulations et des crevasses avaient envahi le terrain. Nous avons aussi constaté que le dégel avait pénétré le sol plus profondément qu'avant, jusqu'à un mètre de profondeur en certains endroits. Un phénomène que nous n'avions jamais observé.

Ces observations inhabituelles s'ajoutent à nombre de phénomènes inédits dans l'Arctique : un recul record de la banquise, une fonte des neiges précoce dans tout l'hémisphère Nord et une fonte précoce de la couche de glace au Groenland. Ainsi, davantage de sols dégelés sont actuellement en train d'émettre des gaz, phénomène qui va se poursuivre de façon soutenue pendant des décennies. Nul doute qu'il compliquera le défi impressionnant auquel est déjà confrontée l'humanité : freiner le réchauffement climatique. ■



CETTE TOUR INSTRUMENTALE sert à mesurer, tout au long de l'année, les transferts de dioxyde de carbone et de méthane entre le sol et l'atmosphère. Elle permet de faire le bilan des émissions de gaz à effet de serre par l'écosystème de toundra où elle est implantée.

■ BIBLIOGRAPHIE

E. A. G. Schuur *et al.*, **Climate change and the permafrost carbon feedback**, *Nature*, vol. 520, pp. 171-179, 2015.

E. A. G. Schuur *et al.*, **Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change**, *Climatic Change*, vol. 119(2), pp. 359-374, 2013.

E. A. G. Schuur et B. Abbott, **High risk of permafrost thaw**, *Nature*, vol. 480, pp. 32-33, 2011.

K. Walter Anthony, **Méthane : un péril fait surface**, *Pour la Science* n° 390, avril 2010.

Vers une définition quantique du kilogramme

Tim Folger



LA BALANCE DU WATT,
ici celle du NIST (l'Institut américain
des normes et des technologies),
convertit une puissance électrique en
puissance mécanique, et vice versa.
Grâce à sa grande précision, elle joue
un rôle clé dans le processus
de redéfinition du kilogramme
à partir de la constante de Planck.

L'ESSENTIEL

- Depuis 1889,
le kilogramme est défini
par un étalon matériel,
un cylindre de platine
et d'iridium conservé
à Sèvres, près de Paris.
- L'étalon a perdu de
la masse ces dernières
décennies. L'incertitude
sur sa définition
augmente et pose des
questions sur sa fiabilité.
- En 2011, la Conférence
générale des poids et
mesures a décidé de
redéfinir le kilogramme
à partir d'une constante
d'origine quantique,
la constante de Planck.
- La nouvelle définition
sera officielle en 2018.

© Richard Barnes

Plus fiable et plus précise, la nouvelle définition du kilogramme reposera, à partir de 2018, sur une constante fondamentale liée à la physique quantique.

Travailler à redéfinir le kilogramme conduit parfois à des situations étonnantes. Un après-midi d'avril 2016, à l'aéroport international de Washington, Jon Pratt se dirigeait nerveusement vers le poste de contrôle des bagages. Dans son sac, il avait rangé quatre cylindres métalliques, qui ne manqueraient pas d'attirer l'attention des agents de sécurité. Chaque cylindre pesait exactement un kilogramme. L'un d'eux, fait d'un alliage brillant de platine et d'iridium, valait au moins 40 000 dollars. Les trois autres, en acier inoxydable, avaient été fabriqués avec tout autant d'attention.

Jon Pratt, qui dirige la division Mesures quantiques du NIST, l'Institut américain des normes et des technologies, avait pour mission de livrer les cylindres intacts à ses collègues dans la banlieue de Paris. Pour passer sans encombre les contrôles de l'aéroport, il était muni de documents officiels qui précisaient que les cylindres étaient quatre étalons américains du kilogramme – objets qui servent de référence pour toutes les mesures de masse dans le pays. En outre, il était précisé que ces cylindres ne devaient en aucun cas être touchés ou retirés de leur étui de protection.

Le « Grand K », l'étalon des étalons

Si quelqu'un avait posé ses doigts sur l'un des cylindres, cela aurait ruiné les mois de travail qu'avait requis la mesure de sa masse avec une précision de l'ordre de quelques milliardièmes. Jon Pratt apportait les cylindres au BIPM, le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, près de Paris, afin de comparer les étalons américains avec ceux de trois autres pays, ainsi qu'avec une boule de un kilogramme de silicium purifié, fabriquée par le laboratoire de métrologie allemand. Un événement historique dans le domaine de la métrologie.

Depuis 1889, le kilogramme est défini à partir d'un cylindre de platine iridié (un alliage de 90 % de platine et 10 % d'iridium, ce dernier élément servant de durcissant) conservé sous une triple cloche de verre dans un coffre-fort du BIPM. Le prototype international du kilogramme, surnommé le Grand K, sert de référence pour définir les étalons de masse de tous les pays.

Aujourd'hui, le kilogramme constitue une anomalie : c'est la dernière unité de mesure encore associée à un objet matériel... Mais plus pour très longtemps. D'ici à la fin 2018, le Grand K prendra sa retraite. Le kilogramme aura une nouvelle définition fondée sur la constante de Planck, une constante fondamentale intervenant dans les lois de la physique quantique et reliée à la quantité d'énergie que peut transporter un unique photon, la particule de lumière.

Quand le kilogramme maigrit

Mais pourquoi ne plus utiliser le Grand K ? Depuis des années, les métrologues rêvent d'un étalon international de masse précis et fiable, qui soit relié à des constantes fondamentales de la nature plutôt qu'à un morceau de métal d'un autre temps. Et il y a une raison beaucoup plus pressante à vouloir trouver un successeur au Grand K : ce dernier semble perdre de la masse ! Une fois tous les trente ans environ, le Grand K est extrait de son coffre pour être nettoyé et comparé à six copies officielles, les « témoins », conservés dans le même coffre. Lorsque les deux premiers témoins ont été comparés au Grand K en 1889, leur différence a été déterminée avec une grande précision. Mais, en 1946, lorsque le Grand K a été comparé à ses six témoins, la différence avait changé. Le Grand K pesait 30 microgrammes de moins que ces derniers. En 1992, la différence était passée à 50 microgrammes, l'équivalent d'une aile de mouche.

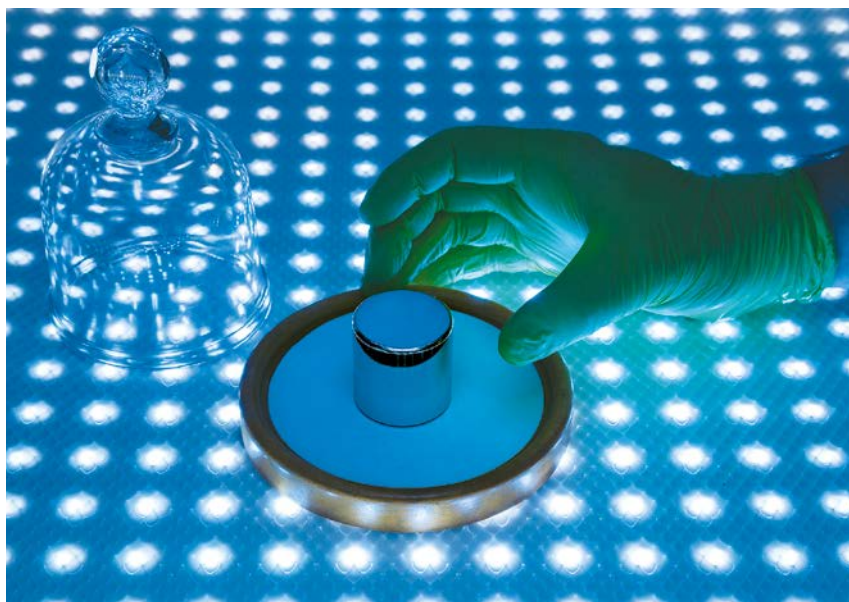
■ L'AUTEUR



Tim FOLGER est journaliste scientifique. Il contribue régulièrement aux revues

National Geographic, Discover et Scientific American.

K20, L'UN DES ÉTALONS AMÉRICAINS du kilogramme, est un cylindre de platine iridié, comme le Grand K. Il est l'un des deux prototypes attribués aux États-Unis en 1889.



© Richard Barnes

Il est peu probable que les deux témoins aient pris du poids tandis que le Grand K serait resté égal à lui-même. Pour Michael Stock, directeur du département Métrologie en physique du BIPM, il est plus probable que le prototype international du kilogramme ait perdu de la masse. Du fait de cette incertitude, les membres de la Conférence générale des poids et mesures (l'organisme décisionnel en matière de métrologie et, en particulier, des unités du système international) ont décidé en 2011 qu'une nouvelle référence de masse est nécessaire.

Personne ne sait pour quelle raison le Grand K perd de la masse. Et il reste trop précieux pour autoriser sur cet objet les tests qui pourraient apporter une réponse. Ainsi, ce problème pose la question de la fiabilité de cet étalon et donc de la définition du kilogramme.

Vers un nouvel étalon

Et les conséquences du problème du Grand K ne se limitent pas à la question de la masse. L'incertitude sur la valeur du kilogramme se propage à d'autres unités fondamentales. Ainsi, l'unité de force, le newton, est définie à partir du kilogramme, puis le newton intervient pour expliciter le joule, l'unité d'énergie, et le joule est lié au watt, l'unité de puissance, et ainsi de suite. En fin de compte, cette petite incertitude entache chaque mesure du monde physique. Par ailleurs, on se sert de certaines de ces unités pour définir la valeur des constantes fondamentales ; or, comme l'explique Michael Stock, « nous en sommes au point où la valeur de certaines constantes fondamentales varie parce que le prototype international du kilogramme varie. C'est absurde. »

Le kilogramme n'est pas la seule des sept unités de base du système métrique à être repensée. Le système international (SI) des unités regroupe le kilogramme, le mètre, l'ampère (pour l'intensité d'un courant électrique), la seconde, la candela (pour mesurer l'intensité lumineuse), la mole (qui relie la masse d'un objet au nombre d'atomes qu'il contient) et le kelvin (pour la température).

Trois unités du système international ont été redéfinies ces dernières décennies. On définissait autrefois la seconde comme une fraction de la durée d'un jour ; avec l'avènement des horloges atomiques, dans les années 1960, la durée correspondant à la seconde a été redéfinie en 1967 comme

étant l'inverse de la fréquence d'un rayonnement particulier émis par les atomes de césium. En 1983, le mètre, jusque-là défini comme la distance séparant deux encoches dans une barre de platine iridié conservée dans le même coffre que le Grand K, est devenu la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ de seconde. Et la définition de la candela a été revue en 1979 (voir l'encadré page 66).

Créer un système d'unités universel

À l'instar du kilogramme, la mole, le kelvin et l'ampère sont programmés pour être redéfinis en 2018. L'ampère, par exemple, est dans une situation assez étrange. Sa définition officielle est si abstraite qu'elle ne peut être reproduite en laboratoire : elle implique de mesurer la force qui s'exerce entre deux fils parallèles infiniment longs, sans épaisseur et sans masse, parcourus par un courant électrique. À compter de 2018, l'ampère sera défini à partir de la charge de l'électron. Actuellement, on étudie plusieurs approches pour la mettre en œuvre. Elles font appel à divers effets quantiques et des dispositifs capables de compter des électrons un par un dans un circuit.

Des réflexions sont déjà en cours pour redéfinir la candela sur des principes quantiques ou de revoir la définition de la seconde. Mais ces améliorations ne sont pas prévues avant au moins une quinzaine d'années.

La redéfinition du kilogramme est de loin la plus urgente. Elle s'inscrit au cœur d'un effort visant à créer un système d'unités réellement universel, qui ne serait pas lié à des conventions arbitraires et anthropocentrées. En principe, les nouvelles unités devraient avoir du sens pour des êtres intelligents vivant sur d'autres planètes. Pour les métrologues, c'est un moment unique dans l'histoire des unités.

Cette idée d'universalité remonte à la Révolution française, quand le système métrique est né. Auparavant, partout en France, des règles locales définissaient les poids et les longueurs. Les normes variaient d'une ville à l'autre, et pas moins de 700 unités de mesure étaient en vigueur dans le pays. Une toise, par exemple, était l'équivalent du *fathom* anglais : la distance entre les deux bras écartés. Mais la toise parisienne n'était pas forcément identique à la toise utilisée à Marseille. Les savants de l'époque ont donc voulu mettre fin à

ce chaos en créant un nouveau système qui soit universel, « à tous les temps, à tous les peuples ». C'est dans ce contexte qu'est né le premier kilogramme étalon, le prédécesseur du Grand K.

Richard Davis a dirigé l'ancien département de recherche sur la masse au BIPM, et assistait le directeur du bureau dans ses responsabilités de maintenance du Grand K. Il explique qu'« en 1791, l'idée était que les étalons devaient reposer sur des phénomènes naturels et immuables. Nous travaillons aujourd'hui à partir de cette même idée. » La différence est que les métrologues d'aujourd'hui se fondent sur des constantes naturelles réellement invariables.

Après la Révolution française, l'histoire des étalons du kilogramme s'est déroulée au pavillon de Breteuil, à Sèvres, qui héberge le BIPM depuis 1875, lorsque le traité de la Convention du mètre a été signé par dix-sept nations. Pendant la Seconde Guerre mondiale, des bombardements ont fait trembler le pavillon. D'après la Convention, l'étalon ne peut quitter ce lieu. Il a alors été décidé de placer le Grand K dans un coffre antichoc spécial. Les témoins, eux, ont été mis à l'abri dans un coffre au sous-sol de la Banque de France.

Il est nécessaire de nettoyer de temps en temps le Grand K et de le comparer aux témoins. Cette opération est loin d'être anodine ; elle n'a d'ailleurs été réalisée que quatre fois depuis 1889. D'abord, on doit extraire le Grand K du caveau où est entreposé le coffre-fort. Le caveau est fermé grâce à trois verrous différents dont les clés sont réparties entre le directeur du BIPM, le directeur des Archives nationales de Paris et le président du Comité international des poids et mesures (CIPM), qui supervise le travail du BIPM. Ainsi, les trois représentants doivent être présents pour accéder au coffre-fort, lequel est protégé à son tour par un code. À l'intérieur, le Grand K est isolé sous une triple cloche. Le coffre contient aussi les six témoins.

Les trois porteurs des clés se réunissent une fois l'an pour ouvrir le caveau et vérifier que le Grand K est toujours là, mais

En 2018,
quand le kilogramme
sera défini à partir de
la constante de Planck,
le Grand K
deviendra une curiosité
historique

CHANGER LES UNITÉS DE MESURE

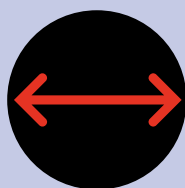
Le Système international (SI) est adopté officiellement par la plupart des pays du monde (les trois exceptions étant la Birmanie, le Liberia et les États-Unis). Il est fondé sur sept unités de mesure, à partir desquelles on définit 22 autres unités (telles que le newton, le joule, le tesla, le volt, le pascal, etc.). En 2018, le Comité international des poids et mesures redéfinira quatre de ces unités de base. Les valeurs de quatre constantes de la nature (la constante de Planck h , la charge électrique élémentaire e , la constante de Boltzmann k_B et le nombre d'Avogadro N_A) seront fixées précisément afin de donner une nouvelle définition au kilogramme, à l'ampère, au kelvin et à la mole. Le mètre, la seconde et la candela ne changent pas de définition, au moins dans un futur proche.

Les unités qui ne changent pas de définition

Unité : **Mètre (m)**
Mesure de la longueur

Définition actuelle (1983)

En 1983, la Conférence générale des poids et mesures a défini la vitesse de la lumière dans le vide comme étant égale à 299 792 458 mètres par seconde. Le mètre est donc la distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ de seconde.



Note historique

Lorsque l'Académie des sciences française a proposé le système métrique en 1791, le mètre a été défini comme $1/10\,000\,000$ de la moitié du méridien reliant le pôle Nord au pôle Sud en passant par Paris.



Unité : **Seconde (s)**
Mesure du temps

Définition actuelle (1967)

La seconde est 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.

Note historique

La définition originale de la seconde est $1/86\,400$ de jour solaire terrestre moyen.

Unité : **Candela (cd)**
Mesure de l'intensité lumineuse

Définition actuelle (1979)

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique à une longueur d'onde de 555 nanomètres et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1/683$ de watt par stéradian. En pratique, dans le cas d'une source émettant plusieurs fréquences, on utilise des fonctions de pondération décrivant la sensibilité spectrale relative de l'œil humain.

Note historique

Au début du XX^e siècle, la candela était définie à partir de l'intensité lumineuse d'une lampe à filament de carbone. En 1933, la définition a été améliorée en se référant au rayonnement du corps noir.



il est hors de question d'y toucher. Finalement, peu de membres du BIPM ont vu le Grand K, et même les photos officielles sont celles d'un fac-similé. « Je l'ai vu une fois », nous raconte Susanne Picard, qui travaille au pavillon de Breteuil depuis 1987.

Pour le nettoyage, on suit scrupuleusement un protocole. Un technicien saisit le cylindre brillant avec une pince recouverte de peau de chamois et le transporte jusqu'au site de nettoyage. On le frotte alors avec une peau de chamois imbibée d'alcool et d'éther, puis on le rince deux fois avec de l'eau distillée. Un jet d'azote gazeux permet de le sécher. L'opération dure environ une heure.

Le BIPM a expérimenté différentes techniques de nettoyage sur des masses tests – en utilisant des rayonnements ultraviolets par exemple –, mais ces méthodes

rendaient les objets trop propres. Michael Stock explique qu'en effet, « ces techniques décapent trop bien la surface du cylindre ; elles enlèvent plus de saletés que la méthode traditionnelle, la surface devient alors très instable car beaucoup trop réactive. » Le Grand K deviendrait alors beaucoup moins fiable. Dès lors, le Bureau en reste à la méthode habituelle.

Après le nettoyage, l'équipe apporte le Grand K et les témoins dans une salle blanche où se trouve le comparateur de masses, un instrument d'une valeur de près de 500 000 euros capable de détecter des différences de masse de l'ordre du microgramme. Au quotidien, le département des masses du BIPM utilise le comparateur de masses et dix étalons de référence pour effectuer diverses opérations de calibrage.

On ne sort le Grand K et ses témoins que toutes les quelques décennies pour vérifier les étalons nationaux.

Une mesure difficile

Quand la nouvelle définition du kilogramme sera fondée sur la constante de Planck, le Grand K ne sera plus qu'une curiosité historique. Cette constante est notée h et est égale à environ $6,626 \times 10^{-34}$ joule · seconde. Son unité combine l'énergie et le temps, mais on peut la relier à la masse en utilisant la relation d'Einstein $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Comme G , la constante newtonienne de la gravitation, la constante de Planck apparaît dans la théorie, mais sa valeur ne peut être déterminée que par l'expérience.

Les unités à redéfinir

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

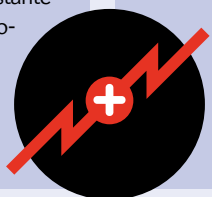
Définition actuelle (1889)

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

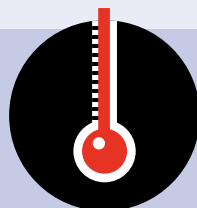
Définition actuelle (1946)

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.

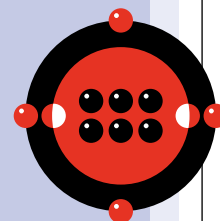
Unité : **Mole (mol)**
Mesure de la quantité d'une substance donnée

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 Schlamming, 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 Schlamming 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.

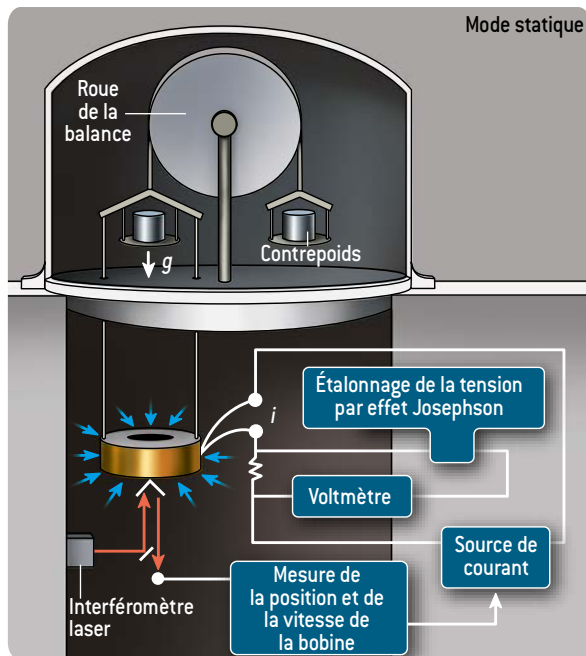
En combinant les mesures des deux modes, on élimine le produit BL , qu'il est difficile de mesurer avec précision. On obtient $mgv = Ui$. Chaque membre de cette égalité a la dimension d'une puissance (puissance mécanique, à gauche, et puissance électrique, à droite), d'où le nom de balance du watt (l'unité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

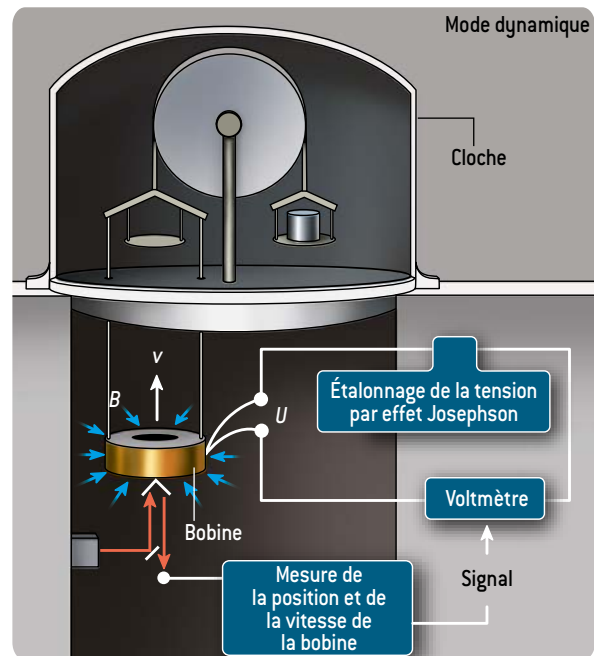
matériaux supraconducteurs, les électrons s'associent par paires, les paires de Cooper, et circulent sans résistance. Ces paires n'existent pas dans les isolants, mais elles passent ici d'un supraconducteur à l'autre par effet tunnel. En irradiant la jonction à une fréquence donnée f , la tension à travers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

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.

PLS

Existe-t-il une autre méthode pour mesurer la constante de Planck ?

R.D. : Une approche complémentaire consiste à relier le kilogramme à la constante de Planck en passant par la masse d'un atome de silicium. L'idée est d'utiliser une boule parfaitement sphérique de silicium sans aspérités et dont la structure cristalline doit être sans défauts ni impuretés. Connaissant le volume occupé par un atome dans le réseau cristallin et le volume de la sphère, on peut évaluer le nombre N d'atomes de silicium dans la sphère, qui est identique au rapport de la masse m de la sphère à la masse d'un seul atome de silicium. Il faut ensuite relier la masse d'un atome de silicium avec la constante de Planck. Ce lien ne dépend pas du Grand K et les physiciens l'ont mesuré (avec des techniques d'interférométrie atomique par exemple) avec une grande précision, meilleure que celle demandée pour la redéfinition du kilogramme.

PLS

Où en sommes-nous dans le processus de redéfinition du kilogramme ?

R.D. : Nous suivons une feuille de route avec un calendrier précis. Les laboratoires mesurent actuellement la constante de Planck. Certaines contraintes ont été fixées : trois expériences (balance du watt ou sphère de silicium) doivent avoir une incertitude inférieure à 50 pour 1 milliard, dont une avec une précision meilleure que 20 pour 1 milliard, ce qui est le cas pour la balance canadienne et pour la sphère de silicium. Ces résultats doivent être acceptés pour publication d'ici au 1^{er} juillet 2017. Si tout se passe bien, la Conférence générale des poids et mesures se réunira pour adopter une nouvelle définition du kilogramme à l'automne 2018.

PLS

Quel impact sur les laboratoires de métrologie cette redéfinition du kilogramme aura-t-elle ?

R.D. : Après la Conférence générale, il faudra mettre en place cette nouvelle défini-



LE GRAND K, cylindre en platine iridiée dont on voit ici un fac-similé protégé sous une triple cloche de verre, a été la référence internationale du kilogramme pendant près de 130 ans. La nouvelle définition du kilogramme, prévue pour 2018, s'appuiera sur une constante universelle, la constante de Planck, et non sur un étalon matériel.

tion dans les laboratoires, ce qui prendra plusieurs mois. Le BIPM jouera un rôle important de coordination à ce stade.

Les balances du watt ne seront pas utilisées au quotidien, au moins dans un premier temps. Elles sont trop complexes à faire fonctionner. Elles seront donc utilisées, à l'instar du Grand K, de temps en temps pour étalonner un prototype de référence. Ces étalons matériels sont pratiques et ont fait leurs preuves en usage quotidien.

Bien sûr, on peut aussi imaginer que le directeur d'un laboratoire de métrologie voudra utiliser sa balance du watt plus régulièrement pour faire des étalonnages. Le développement des balances du watt ne s'arrêtera donc pas avec la mesure de la constante de Planck. En outre, d'autres laboratoires voudront peut-être construire leur propre balance du watt. Ici encore, le BIPM continuera de jouer un rôle de coordination en s'assurant que ceux qui souhaitent étalonner le kilogramme puissent le faire avec une précision suffisante.

Finalement, cela va peu changer le quotidien des métrologues, mais ils travailleront à partir d'une définition plus fiable et pratique du kilogramme. Le seul

domaine qui pourrait connaître un changement est celui des électroniciens, qui utilisent des unités fondées sur une valeur conventionnelle de la constante de Planck. Lorsque la valeur de cette constante sera fixée une fois pour toutes, celles utilisées par les électroniciens seront modifiées, mais de façon infime. Et une fois la transition opérée, il n'y aura pas besoin d'y revenir.

PLS

Les étalons matériels resteront utiles. Qu'en est-il du Grand K ?

R.D. : Le Grand K ne va pas non plus disparaître avec la nouvelle définition du kilogramme. La Convention du mètre, signée en 1875 et toujours en vigueur, impose la conservation du prototype international au BIPM dans les conditions préconisées. De même, nous avons toujours la barre de platine qui définissait le mètre à l'époque.

En outre, le Grand K sera probablement confronté à une balance du watt pour enfin savoir si sa masse était stable ou si elle avait au contraire varié. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

La saga du premier câble transatlantique

Ainissa Ramirez

Il y a 160 ans débutait une épopée qui n'avait rien à envier à celle du rail : la pose d'un câble télégraphique sous-marin reliant l'Amérique à l'Europe.

Mardi 4 août 1857. La flotte du télégraphe, constituée de huit navires – quatre américains et quatre anglais – quitte le port de Queenstown, près de Cork en Irlande, en direction de Valentia, une petite île au large de la côte ouest irlandaise. Deux des bateaux, le USS *Niagara*, de la New York Navy Yard, et le HMS *Agamemnon*, de la Royal Navy britannique, ont une cargaison un peu particulière. Chacun porte la moitié d'un câble télégraphique destiné à relier l'île et Terre-Neuve, au Canada, à travers l'océan Atlantique. Mis au point dans les années 1830, le télégraphe électrique a fait ses preuves sur de longues distances terrestres, et un câble télégraphique sous-marin a déjà été installé, en 1851, entre Douvres et Calais. Toutefois, l'ambition est ici d'un tout autre ordre : la longueur totale du câble est d'environ 4 000 kilomètres.

L'expédition commence le 7 août. Les deux navires font tous deux route vers l'ouest. Le *Niagara* dépose peu à peu son câble sur le fond marin. À la fin de la pose, il est prévu de connecter le câble à celui du second navire, qui prendra le relais. Tout va bien jusqu'au soir du 10 août, où se produit un accident sur la machine de pose du câble. Celui-ci se bloque et, sous l'effet de la tension, due notamment à une forte houle, casse brutalement. Plus de 500 kilomètres de câble sont perdus.

La pose complète d'un câble transatlantique n'a eu lieu qu'un an plus tard, durant l'été 1858. Ce fut le premier pas d'une technologie qui a non seulement révolutionné les

L'ESSENTIEL

■ En 1854, Cyrus West Field, un riche industriel américain, se prit de passion pour une idée : installer le télégraphe entre l'Irlande et Terre-Neuve.

■ Une première expédition échoua en 1857. Mais un an plus tard, avec une troisième tentative, un câble long d'environ 4 000 kilomètres relia enfin les deux côtés de l'Atlantique.

■ La victoire fut courte : il ne fonctionna que pendant quatre semaines. Une liaison télégraphique durable ne fut établie qu'en 1866.

