ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES
POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

LE SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS (SI) VERSION 2018 - QUELS IMPACTS ET QUELLES PERSPECTIVES ?

Thomas Grenon
Membre de l'Académie des technologies

Séance organisée le 25 octobre 2023 et présentée par Maguelonne Chambon, directrice de la Recherche Scientifique et Technologique au LNE

Résumé

La Conférence générale des poids et mesures (CGPM) a adopté, en 2018, de nouvelles définitions pour les unités de mesure basées sur des constantes fondamentales de la physique, en particulier pour le kilogramme (kg), le kelvin (K), l'ampère (A) et la mole (mol). Le séminaire propose de montrer quels impacts ces nouvelles définitions ont pu avoir sur deux domaines spécifiques : le kilogramme et l'ampère.

Un focus particulier est fait sur l'unité de masse : le kilogramme. Il est possible de réaliser le kilogramme de manière traçable, sans recourir à une masse de référence, ce que permet le dispositif expérimental dit « balances de Kibble ». La réalisation effective du kilogramme s'effectue en pratique à l'heure actuelle par des comparaisons internationales des résultats des dispositifs primaires, jusqu'à ce que leurs performances soient suffisamment en accord pour des réalisations indépendantes. De plus, cette nouvelle définition permet la détermination directe de masse à l'échelle du milligramme, la détermination de forces et de très faibles forces, mais aussi de moments de forces. De nombreuses nouvelles expériences de métrologie liées aux grandeurs apparentées aux masses sont désormais possibles.

Intervenants

Matthieu Thomas
Chef de projet au LNE

Wilfrid Poirier
Directeur de recherche au LNE

Sommaire

Balances de Kibble pour la réalisation du kilogramme : nouvelles perspectives pour les masses et grandeurs apparentées 2

Les unités électriques à l'ère quantique 3

Balances de Kibble pour la réalisation du kilogramme : nouvelles perspectives pour les masses et grandeurs apparentées

Matthieu Thomas

Matthieu Thomas travaille à la conception, l'amélioration et l'établissement du bilan d'incertitude de la balance de Kibble du LNE. Il a débuté dans ce domaine en soutenant une thèse de doctorat de métrologie au Conservatoire national des arts et métiers en 2015, portant sur la mesure de la constante de Planck au moyen de cette balance. Désormais, il s'intéresse également à la réalisation directe et traçable des masses au niveau du milligramme.

Réalisation du kg

Depuis l'adoption par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM), en 2018, de nouvelles définitions pour les unités de mesure basées sur des constantes de la physique, il est possible de réaliser le kilogramme aux meilleurs niveaux d'incertitudes, sans se référer à la valeur d'une autre masse et en se basant sur la valeur fixée de la constante de Planck. Deux expériences permettent d'atteindre cette objectif : celles des sphères de silicium et celles des balances de Kibble. Ces dernières permettent de nombreuses applications métrologiques et seront le sujet de cette présentation.

Principe de la balance de Kibble et exemple au LNE

La méthode de la balance de Kibble consiste en un dispositif électromagnétique conçu autour d'un comparateur de forces. Ce comparateur de force permet de déterminer de manière absolue le poids d'une masse étalon car il est utilisé de manière à comparer sans biais (« phase statique ») ce poids à une force électromagnétique (courant circulant dans une bobine plongée dans un champ magnétique). Cette force électromagnétique est elle-même estimée de manière absolue à partir d'une seconde phase, en déplaçant verticalement la bobine dans le champ magnétique (« phase dynamique »). Enfin, l'utilisation d'étalons électriques quantiques permet d'établir un lien entre la masse macroscopique et la constante de Planck. Ce principe, très général, a été appliqué dans une dizaine d'expériences à travers le monde, et en particulier au LNE (*Figure 1*).



Figure 1 : Photographie de la balance de Kibble du LNE

Dans l'expérience de la balance de Kibble du LNE, pendant la phase statique, la comparaison de force s'effectue au moyen d'un fléau monolithique en aluminium, de longueur 20 cm et muni d'articulations d'épaisseur 40 μm au point le plus fin. Ce fléau supporte d'un côté une tare et de l'autre la masse à estimer ainsi qu'une bobine circulaire (480 m de fil de cuivre) plongée dans l'entrefer d'un circuit magnétique (champ magnétique radial et horizontal d'environ 1 T). Pendant la phase dynamique, l'ensemble est déplacé comme un seul élément au moyen d'un système de guidage à lames flexibles sur 40 mm, à la vitesse caractéristique de 2 mm/s.

Incertitudes

Pour réaliser le kilogramme avec une incertitude cible de l'ordre de quelque 10^{-8} en valeur relative, il faut en premier lieu maîtriser, à des niveaux d'incertitudes proches de l'état de l'art, les étalons de tension, de résistance, de longueur, de temps et d'accélération de la pesanteur, au même endroit et au même instant. Il faut également maîtriser de très nombreux paramètres influant l'exactitude ou la dispersion des mesures.

Par exemple, le poids de la masse à étalonner étant par définition vertical, il faut quantifier et minimiser les forces horizontales et les moments parasites subis par la bobine pendant les phases statiques. De la même façon, il faut quantifier et minimiser les vitesses horizontales et les vitesses angulaires parasites induites pendant les phases dynamiques (typiquement au niveau du μm/s et μrad/s).

Avant la décision de la CGPM de 2018, l'échelle de masse était fixée sur la valeur du prototype international du kilogramme, un cylindre de platine d'une masse de 1 kilogramme par définition. Depuis que la valeur de la constante de Planck a été fixée, il faut s'assurer que l'échelle de masse présente les mêmes performances que dans la définition précédente. Des comparaisons internationales régulières (deux à trois ans de périodicité) visent à obtenir une valeur moyenne de masse donnée par l'ensemble des dispositifs permettant de réaliser le kilogramme. L'objectif désormais est d'améliorer l'accord et les performances des balances de Kibble, dont celle du LNE, de manière à permettre, dans le futur, des réalisations indépendantes à partir des différents dispositifs. De telles balances requièrent de très importants investissements financier et humain et des développements qui peuvent s'étaler sur des décennies.

Développements

Le champ de développement lié à la nouvelle définition est vaste. On peut citer : les balances de Kibble de tables qui sont des balances aux incertitudes compatibles avec la métrologie légale et industrielle, mais dont les dimensions, l'instrumentation et l'expertise nécessaires à leur utilisation sont contenues ; les balances électrostatiques pour des réalisations directes de masses de l'ordre du milligramme (développements en cours au LNE) ; les balances de forces pour les très faibles forces (résolution de l'ordre du piconewton) ; des dispositifs rotatifs permettant une mesure dynamique de moments de forces.

Conclusion

Les balances de Kibble sont des expériences passionnantes nécessitant la maîtrise simultanée de nombreux domaines de la physique et où de nombreux design sont possibles selon la portée, le coût et l'incertitude visée. La nouvelle définition du kilogramme permet de réaliser l'unité de masse à n'importe quelle valeur, pourvu que le dispositif adéquat soit développé : il est également possible de mesurer des forces, des moments de forces, des pressions de radiation… L'amélioration des capacités d'étalonnage sur toute l'échelle de masse est possible : un domaine entier de la métrologie s'ouvre ici.

Les unités électriques à l'ère quantique

Wilfrid Poirier

Wilfrid Poirier est directeur de recherche au Laboratoire national de métrologie et d'essais. Ses travaux de recherches sont consacrés à la métrologie électrique quantique. Ils ont concerné les étalons quantiques de résistance, notamment en graphène, les instruments de mesure de précision, et la réalisation de l'ampère à partir de la charge élémentaire. Il a reçu le prix LNE de la recherche en 2018.

L'histoire des unités électriques débute en 1820 avec la découverte de la grandeur « courant électrique » et des lois électrodynamiques par André-Marie Ampère à la suite de l'expérience clef d'Ørsted démontrant la déviation de l'aiguille d'une boussole orthogonalement au passage « d'électricité » dans un fil. C'est le point de départ non seulement de nombreuses découvertes scientifiques mais également d'innovations dans le domaine électrique, qui vont stimuler une seconde révolution industrielle à la fin du XIX^{e} siècle. Porté par cette effervescence scientifique et technique, se tient à Paris en 1881, le premier congrès international des électriciens durant lequel les définitions des unités électriques sont discutées. Les scientifiques désirent des définitions universelles et les ingénieurs manifestent le besoin d'étalons pratiques. À la suite d'un compromis, les premières unités électriques sont rattachées aux unités du système C.G.S et une représentation de l'unité électrique de base, à savoir l'ohm, est matérialisée par la résistance d'une colonne

de mercure. André-Marie Ampère étant reconnu comme le fondateur de l'électrodynamique, son nom est choisi pour désigner l'unité de courant : l'ampère est le courant produit par un volt dans un ohm. Les définitions de l'ampère et des autres unités électriques évolueront au travers de nouvelles résolutions prises lors des conférences générales des poids et mesures (CGPM) successives. En 1948, l'ampère devient l'unité électrique de base. Sa définition, fondée sur la force d'Ampère et la fixation de la constante magnétique du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \mathrm{N/A^2}$, restera inchangée au sein du système international d'unités (SI), lui-même établi en 1960, jusqu'en mai 2019. Par ailleurs, le volt est défini à partir du watt et de l'ampère, et l'ohm à partir du volt et de l'ampère en appliquant la loi d'Ohm. Cette définition de l'ampère est la première à être fondée sur la fixation d'une constante de la nature, ce qui qui la rendait plus universelle. Cependant, étant liée au newton, elle imposait des réalisations des unités électriques fondées sur des dispositifs électromécaniques complexes, tel que l'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard.

Deux effets quantiques de l'état solide vont vraiment révolutionner la métrologie électrique. L'effet Josephson découvert en 1962, se produit dans des jonctions séparant deux supraconducteurs soumis à un signal radiofréquence de fréquence f_J. Il se manifeste par la quantification de la tension aux valeurs nf_J/K_J, où K_J est théoriquement égal à $2e/h$ et n est un entier, où h est la constante de Planck et e la charge élémentaire.

L'effet Hall quantique, découvert par Klaus von Klitzing en 1980, se manifeste dans les conducteurs bidimensionnels à basse température (quelques kelvins) soumis à un champ magnétique par la quantification de la résistance transverse (Hall) aux valeurs R_K/i, où R_K est théoriquement égal à h/e^2 et i est un entier. Ces deux effets produisent des étalons de résistance et de tension universels dont la reproductibilité relative est meilleure que 10^{-10}. Cependant, la définition électrodynamique de l'ampère impliquait des déterminations de R_K et K_J en unités SI reposant sur des expériences électromécaniques ayant des incertitudes de mesure plus élevées de deux ordres de grandeur. Ce fut un des arguments majeurs de révision profonde du SI, outre la dérive temporelle de l'emblématique artefact du kilogramme.

Une révision historique du SI (*Figure 2*) fondée sur la fixation de sept constantes, dont h et e, est donc adoptée le 16 novembre 2018 lors de la 26e CGPM. Elle entérine les théories de la mécanique quantique et de la physique statistique[1]. L'ampère, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e, égale à $1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A·s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{Cs}$ (fréquence de transition du césium 133). Les unités électriques[2], définies à partir des constantes h et e, peuvent donc être réalisées directement en utilisant les effets quantiques sans incertitude additionnelle.

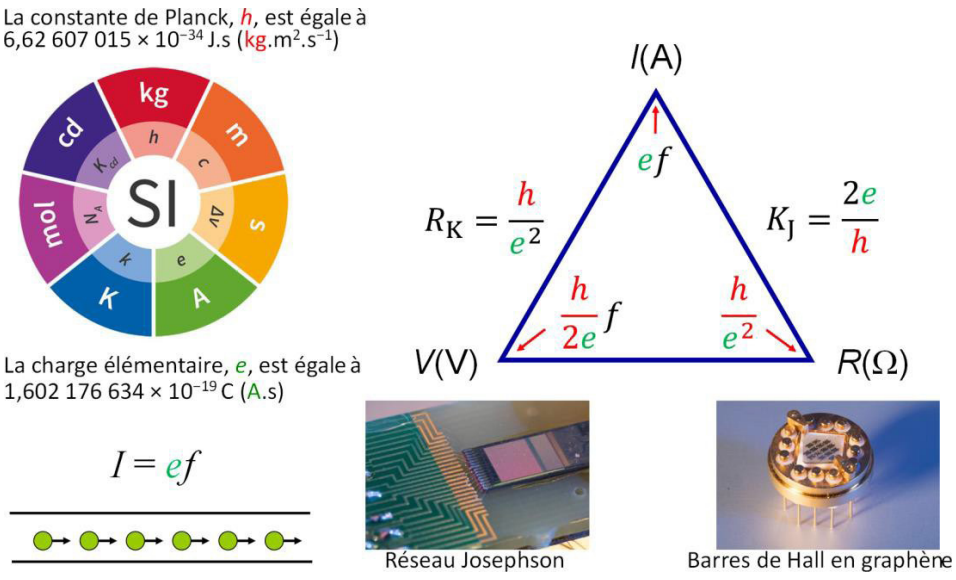


Figure 2 : SI révisé le 16/11/2018. Les relations des unités ampère, volt et ohm avec les constantes h et e.
Photos des étalons quantiques de tension et de résistance

1 Julien *et al*, Le nouveau Système international d'unités, *Reflets phys.* N°62 (2019) 11-31. https://doi.org/10.1051/refdp/201962011

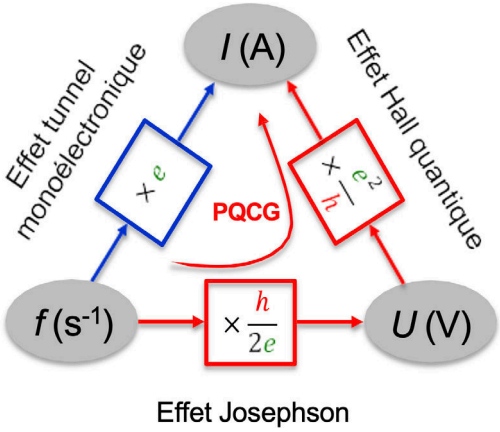
2 W. Poirier *et al*, The ampere and the electrical units in the quantum era, Comptes Rendus Physique 20 (2019). https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.02.003

Grâce à la maîtrise croissante des outils liés aux nanotechnologies, les étalons quantiques ont poursuivi leur évolution continue. Des réseaux Josephson, de 1 V puis de 10 V, ont pu être développés grâce à la mise en série d'un grand nombre de jonctions Josephson. Les réseaux programmables Josephson qui constituent de véritables convertisseurs numériques-analogiques quantiques, tout comme les réseaux à commandes impulsionnelles capables de générer des signaux arbitraires de tension ont amélioré l'étalonnage et la génération de signaux alternatifs. De manière similaire, des réseaux de barres de Hall fabriqués à partir d'hétérostructures en arséniure de gallium ont permis d'atteindre des valeurs de résistance allant de 100 Ω à 1 MΩ Plus récemment, des étalons quantiques de résistance en graphène, monocouche d'atomes de carbone organisés selon un réseau en nid d'abeille, ont démontré un fonctionnement à des températures supérieures (> 4 K) et des inductions magnétiques inférieures (quelques teslas)[3]. Tous ces développements ouvrent la voie à une diffusion des étalons quantiques vers des utilisateurs en dehors des instituts nationaux de métrologie.

Depuis la révision du SI, l'intensité I d'un courant électrique exprimée en ampères peut s'écrire $I=ef$, où f est une fréquence. Deux voies de réalisation quantique de l'ampère ont été développées. La première vise la génération de petits courants (200 pA maximum) en exploitant un effet quantique de confinement des électrons dans de petites structure métalliques, ou blocage de Coulomb, pour manipuler le passage des électrons un par un an au travers d'un îlot de quelques dizaines de nanomètres (pompes à électrons). La seconde voie consiste à appliquer la loi d'Ohm aux étalons quantiques de résistance et de tension. Récemment, le LNE a développé un générateur quantique de courant (PQCG) fondé sur ce principe délivrant des courants allant de 1 μA à 10 mA quantifiés en termes du produit ef avec une incertitude relative record de 10^{-8}, améliorant ainsi la réalisation de l'ampère de deux ordres de grandeur[4]. L'ampère est désormais en voie d'être réalisé avec la même exactitude que le volt ou l'ohm (*Figure 3*).

Les progrès des différents étalons quantiques et leur maitrise, associés aux nouvelles technologies cryogéniques sans consommation d'hélium liquide, permettent désormais le développement de nouvelles réalisations quantiques des unités: la réalisation du kilogramme (à partir de h), du farad (à partir de h/e^2 et de la fréquence) et du kelvin (à partir de h, de la constante de Boltzmann et de la fréquence en utilisant un générateur de bruit blanc quantique).

À plus long terme, un calibrateur quantique universel réalisant le volt, l'ohm, l'ampère et le farad à partir des constantes h et e, au sein d'un unique système cryogénique, se dessine[2].



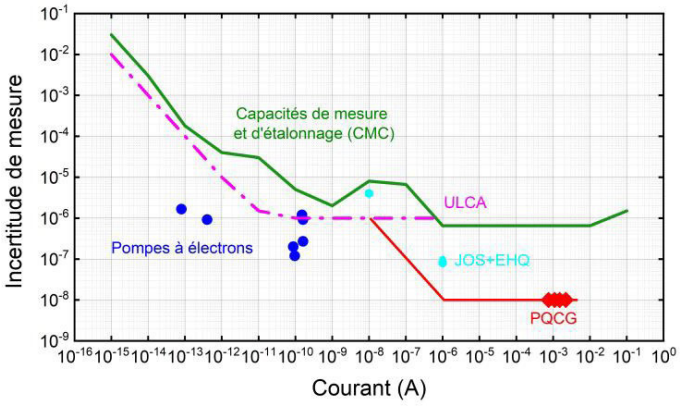


Figure 3: (En haut). Deux voies de réalisation de l'ampère: la mise en œuvre de l'effet tunnel mono-électronique (côté gauche du triangle), l'application de la loi d'Ohm aux effets Hall quantique et Josephson (par les deux autres côtés du triangle). (En bas). État de l'art des réalisations de l'ampère: dans les laboratoires nationaux de métrologie (CMC, en vert) en utilisant des méthodes classiques, en mettant en œuvre des pompes à électrons (en bleu foncé), un amplificateur de courant de haute qualité étalonné par rapport aux effets quantiques (ULCA), l'application de la loi d'Ohm aux étalons quantiques (en bleu clair), et le PQCG du LNE (en rouge).

3 R. Ribeiro-Palau *et al*, Quantum Hall resistance standard in graphene devices under relaxed experimental conditions, *Nature Nanotechnology*, 10,965 (2015). https://doi.org/10.1038/nnano.2015.192

4 J. Brun-Picard *et al*, Practical Quantum Realization of the Ampere from the Elementary Charge, *Phys. Rev. X*, 6, 041051 (2016). https://doi.org/10.1103/PhysRevX.6.041051

L'histoire des unités électriques continue. La découverte de nouveaux effets quantiques ouvre en effet de nouvelles opportunités. L'effet Hall quantique anormal dans les isolants topologiques magnétiques, qui se manifeste par la quantification de la résistance de Hall à champ magnétique nul, offre la perspective d'un étalon quantique de résistance ayant des conditions de fonctionnement compatibles avec celles de l'étalon de tension Josephson. L'accord de la résistance quantifiée mesurée dans ces dispositifs avec h/e^2 a récemment été démontrée avec une incertitude relative de 10^{-8} [5]. Très récemment, ce même effet a été observé dans une hétérostructure de van der Waals fabriquée à partir d'une bicouche de graphène alignée sur une couche de nitrure de bore[6]. Dans un autre registre, un effet dual de l'effet Josephson se caractérisant par la manifestation de marches de courant aux valeurs, $I=2ef$, a été observé dans des systèmes supraconducteurs placés dans un environnement de haute impédance et irradiés par un signal radio-fréquence. Il pourrait fournir un nouvel étalon quantique de courant[7]. Enfin, la métrologie s'intéresse désormais à la mesure de nouvelles quantités électriques.

On citera le paquet d'onde mono-électronique dont la caractérisation peut renseigner sur les processus physiques. L'interférométrie à un électron mise en œuvre dans des systèmes mésoscopiques permet d'envisager la mesure de signaux électriques locaux sur des échelles de temps très courtes, de quelques picosecondes[8].

La métrologie électrique quantique est donc en continuelle évolution. La nouvelle définition de l'ampère permet de réaliser les unités électriques avec des incertitudes plus faibles. La démonstration d'un générateur quantique programmable de courant replace l'unité de courant au centre de la traçabilité primaire des mesures électriques. Les métrologues s'attachent à développer des étalons quantiques plus pratiques, transférables vers les utilisateurs. Une véritable ingénierie quantique, fondée sur la combinaison de plusieurs dispositifs quantiques, est mise en œuvre pour développer de nouvelles applications métrologiques, dont un futur calibrateur quantique universel. Par ailleurs, la métrologie moderne reste toujours à l'écoute des découvertes scientifiques qui ont toujours été porteuses des ruptures dans l'amélioration des mesures électriques.

---

5 Y. Okazaki *et al*, Quantum anomalous Hall effect with a permanent magnet defines a quantum resistance standard, *Nature Physics*, 18, 25 (2022). https://doi.org/10.1038/s41567-021-01424-8

6 M. Serlin *et al*, Intrinsic quantized anomalous Hall effect in a moiré heterostructure, *Science*, 367, 900 (2020). https://doi.org/10.1126/science.aay5533

7 R. S. Shaikhaidarov *et al*, Quantized current steps due to the a.c. coherent quantum phase-slip effect, *Nature*, 608, 45 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-022-04947-z

8 Projet européen EMPIR 17Fun04 « Single-electron quantum optics for quantum-enhanced measurements (SEQUOIA)". www.ptb.de/empir2018/sequoia/home/. White paper: V. Kaschchevevs *et al*, « Single-electron wave packets for quantum metrology: concepts, implementations, and applications." https://doi.org/10.7795/EMPIR.17FUN04.RE.20220228

Mots clés : ampère, balances de Kibble, kilogramme, LNE, nouvelles définitions, unités de mesure

Citation : Thomas Grenon, Maguelonne Chambon, Matthieu Thomas & Wilfrid Poirier. (2023). *Le système international d'unités (SI) version 2018 - quels impacts et quelles perspectives ?* Les séances thématiques de l'Académie des technologies. @

Retrouvez les autres parutions des séances thématiques de l'Académie des technologies sur notre site

Académie des technologies. Le Ponant, 19 rue Leblanc, 75015 Paris. 01 53 85 44 44. academie-technologies.fr
Production du comité des travaux. Directeur de la publication : Denis Ranque. Rédacteur en chef de la série : Hélène Louvel. Auteurs : Matthieu Thomas & Wilfrid Poirier. n° ISSN : 2826-6196.

Les propos retranscrits ici ne constituent pas une position de l'Académie des technologies et ils ne relèvent pas, à sa connaissance, de liens d'intérêts. Chaque intervenant a validé la transcription de sa contribution, les autres participants (questions posées) ne sont pas cités nominativement pour favoriser la liberté des échanges.