

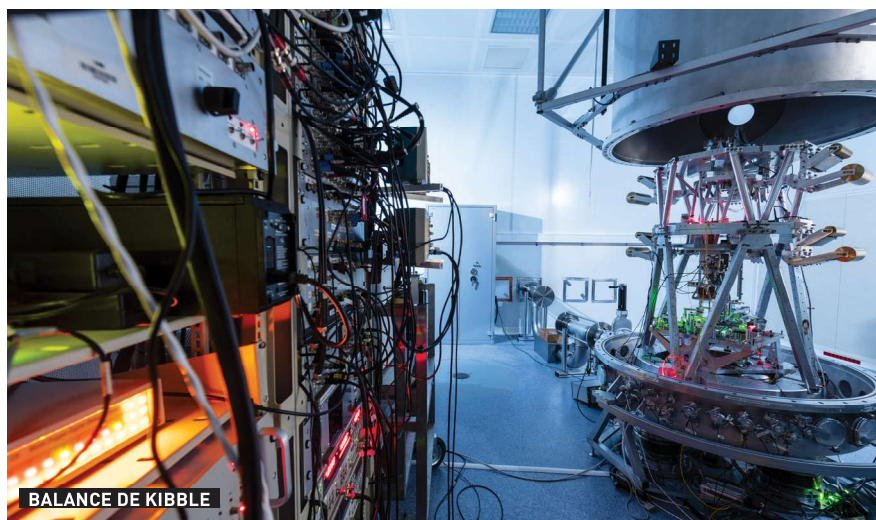
DOSSIER

KILOGRAMME : SA DÉMATÉRIALISATION EN PHASE ACTIVE

Dématérialisé depuis 2019, le kilogramme est désormais fondé sur la valeur d'une constante fondamentale de la mécanique quantique, la constante de Planck. Acteur clé de sa redéfinition en 2018, le LNE est aujourd'hui central pour la mise en pratique de cette nouvelle définition.

Le 20 mai 2019, l'IPK (prototype international du kilogramme), ou grand K, utilisé depuis 1889 comme étalon absolu et comme définition du kilogramme, a tiré sa révérence. Depuis, l'unité de masse n'est plus un artéfact matériel mais, comme les six autres unités de base du système SI, est définie en fonction d'une constante de la physique. Ainsi, comme le mètre se réfère à la vitesse de la lumière ou la seconde à la fréquence d'une transition atomique du césium, le kilogramme est relié à la constante de Planck h , constante emblématique de la physique quantique. Pour mettre en pratique cette nouvelle définition, les laboratoires nationaux de métrologie (LNM) ont mis au point différents dispositifs. Initié dès 2002, le développement d'une balance de Kibble au LNE a placé la France dans le peloton des nations ayant contribué à la mesure de h , préalable indispensable pour inscrire sa valeur numérique exacte dans la définition du SI de 2018. Depuis, la balance française s'est hissée au premier rang européen pour ses performances métrologiques. Et celles-ci ont été mises à profit ces derniers mois pour établir une nouvelle valeur au kilogramme.

Avant la dématérialisation, la valeur du kilogramme étalon était « tout simplement » égale à la masse de l'IPK, conservé au BIPM à Sèvres. Cette définition avait le mérite de la simplicité et de la fonctionnalité. Mais sa mise en œuvre était assez peu universelle. Du reste, en près de 150 ans, la masse du « grand K » a varié d'environ



50 μg et, en parallèle, les répliques de l'IPK ont évolué différemment, montrant toutes les limites d'un étalon matériel pour la définition.

Avec la définition de 2018 qui relie le kilogramme à la constante h , exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, l'unité de masse est devenue en principe intangible. Et c'est dès le milieu des années 1990, que les LNM avaient pris conscience qu'une telle définition était envisageable. Pour la réaliser en pratique, la principale solution, adoptée par le LNE, est une balance de Kibble, du nom du physicien anglais Bryan Kibble qui en eut l'idée en 1976. Ce dispositif permet d'équilibrer le poids d'une masse (force gravitationnelle) avec une force électromagnétique créée par un courant électrique circulant dans une bobine immergée dans un champ magnétique. Les mesures

électriques (tension et courant) établissent alors un lien entre le kilogramme et la constante h car elles sont raccordées au SI par des étalons quantiques.

À terme, chaque LNM pourra réaliser le kilogramme de manière indépendante, à condition d'être capable de peser une masse étalon et d'exprimer sa valeur en fonction de la constante h . Toutefois la réalisation pratique du « kilogramme quantique » relève d'un tour de force expérimental. Aussi, depuis l'entrée en vigueur de la définition de 2018, une valeur internationale est établie par le BIPM pour le kilogramme : une moyenne des valeurs mesurées par quelques LNM dans le monde, lors de campagnes de mesures conjointes organisées régulièrement. Plus précisément, afin d'assurer une continuité avec l'IPK, la valeur actuelle du kilogramme est la

moyenne glissante des valeurs obtenues en 2019, 2021 et lors de l'étude pilote de 2016. À noter qu'à ce jour, les deux mesures assorties des incertitudes les plus faibles – autour de 10^{-8} – réalisées par le laboratoire national canadien et son *alter ego* allemand se révèlent incompatibles, « *signe que nous devons encore améliorer les choses* », juge Matthieu Thomas, chercheur et chef de ce projet au LNE. C'est l'un des enjeux de la comparaison débutée en septembre dernier, à laquelle participent neuf LNM.

La balance française a été construite au LNE à Trappes, dans un bâtiment conçu spécialement pour l'accueillir. L'infrastructure expérimentale repose sur une dalle de béton de 33 m² et 2 m d'épaisseur, pesant 150 t et supportée par des pieux de 12 m de hauteur enfoncés dans le sol. « *C'est indispensable pour se prémunir contre toute vibration extérieure* », commente le physicien. De même, afin d'éviter de « fausser » les mesures par la moindre poussière ou quelque perturbation électromagnétique, l'ensemble est installé dans une salle blanche et est protégé par une cage de Faraday. La structure en aluminium de la balance est placée dans une enceinte à vide (hauteur 3 m et diamètre 2 m) dont la température est contrôlée à 0,1 °C près. Pour le reste, mécanique, fléau, source de courant, circuit magnétique, bobine... « *tout a été conçu et développé par les équipes du LNE, en collaboration avec les équipes « Longueur » et « Masse » du LNE-CNAM, et aucun élément n'a d'équivalent dans le commerce* », précise le chercheur.

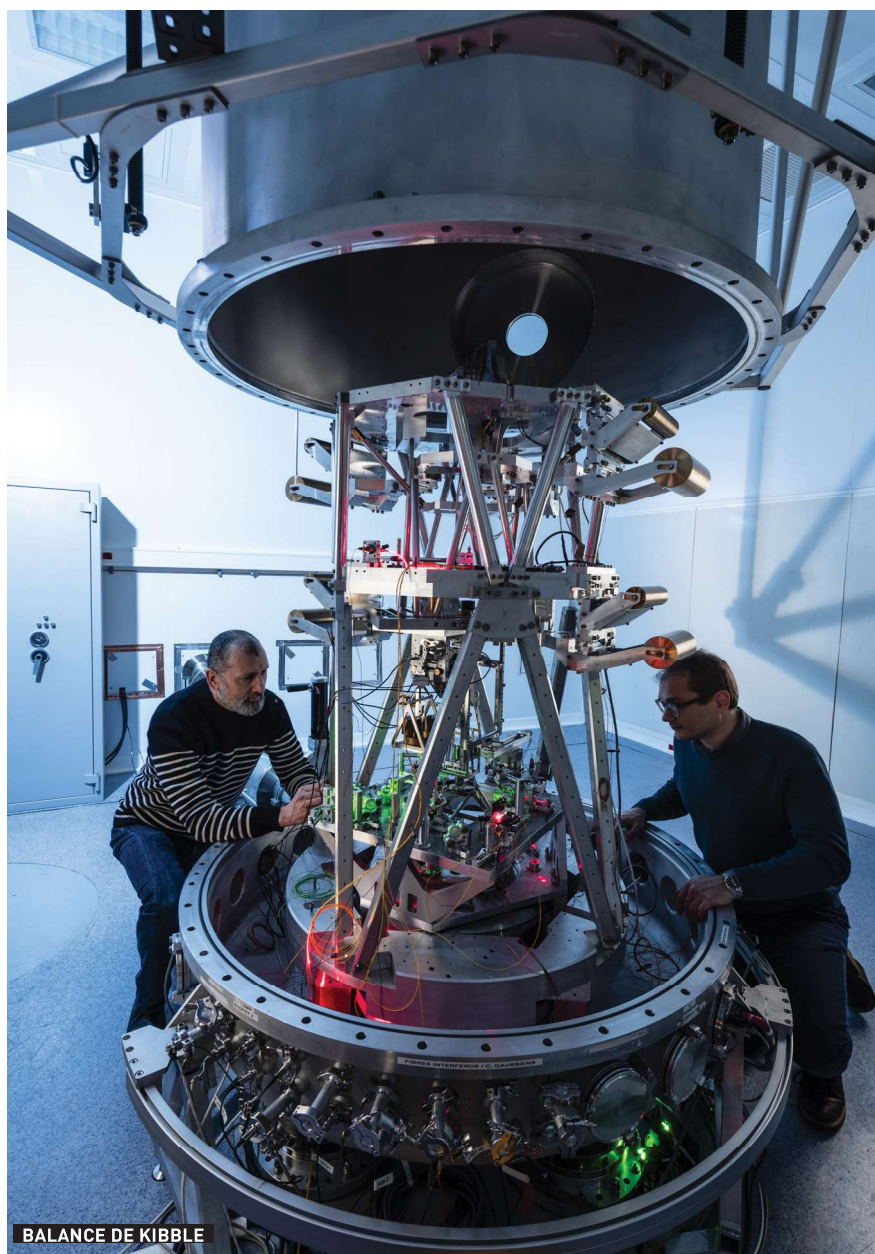
La nécessité d'un tel soin s'explique par la complexité du protocole de pesée, imaginé par B. Kibble, qui comporte deux grandes étapes. Lors de la première étape, dite statique, la masse à évaluer est posée sur le plateau de la balance. Afin de rétablir l'équilibre et compenser la force de pesanteur exercée sur la masse, une force magnétique de sens opposée est créée en faisant circuler un courant dans la bobine suspendue autour du plateau. La valeur de ce courant d'équilibre est alors déterminée par mesure de la tension aux bornes d'une résistance connue avec précision. « *La traçabilité au SI de la mesure de cette résistance est assurée par son étalonnage par rapport aux étalons quantiques de résistance [effet Hall quantique] par le laboratoire de*

métrie électrique, voisin », indique Matthieu Thomas. La tension est, quant à elle, déterminée en utilisant un réseau de tension Josephson, structure micro-électronique qui, lorsqu'elle est irradiée par une onde électromagnétique de fréquence précise, délivre une tension dont la valeur ne dépend que de cette fréquence, de la charge élémentaire e et... de h . La micro-onde d'irradiation est, elle, synchronisée à celle d'une horloge au rubidium asservie sur une référence de fréquence captée par un récepteur GPS et raccordée aux étalons nationaux de fréquence par le LNE-SYRTE.

Ce n'est pas tout. Lors de la seconde étape, dite dynamique, la masse est

retirée de la balance et la bobine est déplacée verticalement à vitesse constante dans un champ magnétique. « *À cette fin, nous avons mis au point un système de guidage qui garantit des écarts maximaux de quelques micromètres et de quelques microradians pour des déplacements d'une dizaine de millimètres* », précise le métrologue. Une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement, au champ magnétique et à la longueur de la bobine apparaît alors aux bornes de cette dernière.

En combinant les relations entre les grandeurs mises en jeu dans les deux étapes, le champ magnétique et la longueur de la bobine (difficiles



BALANCE DE KIBBLE

DOSSIER

à mesurer] s'éliminent de l'équation finale qui permet de déterminer la masse. Celle-ci est *in fine* fonction du courant mesuré lors de la phase statique, de la tension aux bornes de la bobine et de la vitesse de déplacement mesurées lors de la phase dynamique, sans oublier l'accélération de la pesanteur g qui est déterminée au centre de gravité de la masse. En pratique, pour mesurer cette tension en phase dynamique, les métrologues utilisent un réseau de tensions Josephson, étalon quantique primaire, et la vitesse de déplacement de la bobine est obtenue par la mesure interférométrique de longueurs et la mesure de temps, toutes deux raccordées au SI. À noter que la valeur de l'accélération de la pesanteur, qui varie dans l'espace et le temps du fait notamment des marées, est fournie toutes les minutes par le LNE-SYRTE en charge du laboratoire national de gravimétrie, mitoyen ! Comme le résume le métrologue, « aucune autre expérience de métrologie n'implique autant de grandeurs (longueur, temps, fréquence, résistance et tension électrique, gravité, et même température), à mesurer simultanément sur un même objet. La balance de Kibble du LNE est d'une certaine manière le point focal du laboratoire. »

Mise en place initialement dans la perspective de la redéfinition du kilogramme, l'installation a d'abord été utilisée dans un mode « inversé » afin de mesurer la constante de Planck



ÉCHANGEUR D'ÉTALONS DE MASSE

BALANCE À FORCE ÉLECTROSTATIQUE : RÉALISER ET DISSÉMINER DES RÉFÉRENCES JUSQU'AU MILLIGRAMME

Administration de médicaments, expériences de biotechnologie, dépôt de couches minces... de nombreuses applications nécessitent l'étalonnage d'étalons de masse dans la gamme du milligramme et en deçà. Or le raccordement des sous-multiples du kilogramme à la référence du kilogramme « quantique » nécessite de nombreuses comparaisons successives d'étalons qui créent une inflation d'incertitudes de mesure. Ainsi, de l'ordre de 10^{-8} pour une masse autour de 1 kg, elles atteignent 10^{-4} dans la gamme de 1 mg. Pour pallier cette difficulté, le LNE développe depuis 2021 une expérience pour mesurer des masses inférieures à 1 mg, qui reliera directement la valeur de la masse à la constante de Planck. Elle repose sur une balance à force électrostatique qui permet de réaliser un équilibre entre le poids d'une masse et la force d'attraction entre deux électrodes d'un condensateur soumises à une différence de potentiel électrique. Raccordée aux étalons quantiques électriques, la mesure de cette tension établit le lien entre la masse ainsi déterminée et la constante h .

Comme suite aux premières mesures réalisées l'année dernière, les métrologues du LNE établiront cette année une caractérisation métrologique de leur dispositif. L'objectif visé est d'améliorer d'au moins un facteur 10 l'incertitude d'étalonnage des plus faibles masses.

à partir de l'ancienne définition de l'unité de masse. Avec des incertitudes de mesure de $5,7 \times 10^{-8}$, le laboratoire français, aux côtés des LNM états-unien et canadien, a fait partie des laboratoires ayant fourni une valeur de h au moyen d'une balance de Kibble avec une incertitude conforme aux prescriptions du CIPM.

Concernant la comparaison internationale débutée fin 2024 sur la mesure d'un kilogramme étalon, les métrologues du LNE visent une incertitude inférieure à 4×10^{-8} sur leur mesure de masse, ce qui en fera la plus précise réalisée avec une balance de Kibble en Europe, et la troisième au niveau mondial. « Au regard des résultats obtenus à la fin de l'année passée, cet objectif est réaliste », prédit le scientifique. Pour y parvenir, l'équipe en charge de l'expérience y a apporté de nombreuses améliorations par rapport à la version de 2021. En particulier, le séquençage des mesures et les critères d'asservissement ont été entièrement révisés. De plus, le moteur qui permet de déplacer la bobine durant la phase dynamique a été remplacé par une version « sans contact ». À la clé : une réduction du bruit expérimental d'un facteur 6 par rapport à 2017.

Prochain objectif : que chaque LNM soit en mesure de réaliser le kilogramme de manière indépendante. « Cela sera possible lorsque d'une part l'ensemble des dispositifs expérimentaux délivreront des valeurs compatibles, d'autre part lorsque les incertitudes des mesures réalisées par l'ensemble des laboratoires nationaux qui prétendent réaliser le kilogramme seront inférieures à 2×10^{-8} , indique Matthieu Thomas qui ajoute : c'est notre objectif ! » Dès lors, la dématérialisation de l'unité de masse sera totale, à l'instar des autres unités de base du SI.