

# La balance du watt

## Vers une nouvelle définition du kilogramme

Le kilogramme, dont dépend l'ensemble des unités électriques, est le dernier élément du Système International d'unités SI basé sur un artefact matérialisé : le prototype international du kilogramme IPK. Or les comparaisons faites au cours des cent dernières années entre IPK et ses copies officielles ont clairement mis en évidence l'instabilité du système. L'expérience de la balance du watt, qui permet d'établir un lien entre l'unité de masse et la constante de Planck, constitue une approche prometteuse en vue d'une nouvelle définition du kilogramme.

### A. Eichenberger, H. Baumann, D. Reber, D. Tommasini

De nos jours, l'unité de masse reste la seule qui soit encore matérialisée par un artefact matériel unique, le prototype international du kilogramme (IPK). Il s'agit d'un cylindre en platine iridié (Pt 90% - Ir 10%) usiné vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle et dont la hauteur est égale à son diamètre (39 mm).

Le prototype international, ainsi que six copies officielles sont conservés dans les mêmes conditions, dans un coffre du Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres, près de Paris. Chaque pays membre de la convention du mètre a en outre reçu une copie d'IPK représentant dès lors le prototype national du kilogramme. Le prototype national suisse, illustré par la **figure 1**, porte le numéro 38. Il est conservé dans les laboratoires de l'Institut fédéral de métrologie Metas à Wabern.

Afin de surveiller la stabilité du système de masse ainsi établi, trois comparaisons entre IPK, ses copies officielles et les prototypes nationaux ont eu lieu depuis 1880. Les résultats de ces comparaisons, illustrés par la **figure 2**, montrent clairement une dispersion de la masse des prototypes par rapport à IPK [1].

De par la nature même de la définition, il n'est pas possible d'attribuer cette instabilité de manière formelle au prototype international ou à l'une ou l'autre des copies. En moyenne, l'évolution relative des copies officielles par rapport à IPK est estimée à 0,5 µg/an. Il est important de noter que cette instabilité du kilogramme n'affecte pas uniquement la détermination de la masse. Elle influence également d'autres unités du SI comme la mole, la

candela ou l'ampère. Ainsi, si le kilogramme n'est pas stable, l'ensemble des unités électriques ne l'est pas non plus !

### Vers une nouvelle définition de l'unité de masse

Afin d'assurer une stabilité à long terme de l'unité de masse, une nouvelle définition basée sur une constante fondamentale de la physique doit être réalisée. Au cours des dernières décennies, de nombreuses expériences ont été initiées dans cet objectif [2,3]. Il semble à ce jour que seules les expériences dites de la sphère de silicium et de balances du watt [4] aient les capacités de relever ce défi en reliant le kilogramme à la constante de Planck  $h$ .

À la fin des années nonante, Metas s'est engagé dans le développement d'une balance du watt. Après une longue période de caractérisation, d'amélioration et d'optimisation, une première valeur de la constante de Planck a pu être établie avec une incertitude relative de 3 parts dans 10<sup>7</sup> (30 millièmes de pourcents) [5]. Afin de réduire cette incertitude d'un facteur 10, une seconde expérience a été initiée en collaboration avec le Laboratoire de systèmes robotiques (LSRO) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), le Centre européen de recherche nucléaire (Cern) et l'entreprise Mettler Toledo.

### Principe de fonctionnement de la balance du watt

Le principe de fonctionnement de la balance du watt peut être décomposé en deux phases (**figure 3**) :

- la phase statique ou de pesée;
- et la phase dynamique ou d'induction.

Dans la phase statique, le poids d'une masse  $m$  placée dans le champ de pesanteur local  $g$  est contrebalancé par une force électromagnétique produite par un courant  $I$  circulant dans une bobine placée dans un champ magnétique statique  $B$  :

$$m\vec{g} = I \cdot \oint d\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

où  $dl$  est la longueur élémentaire de la bobine.



**Figure 1** Le prototype national suisse du kilogramme est conservé à l'Institut fédéral de métrologie Metas.

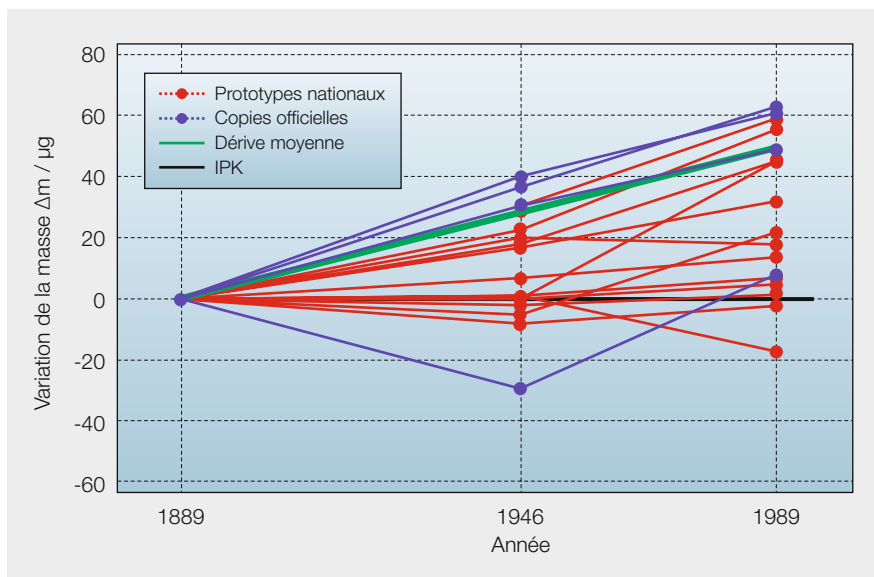


Figure 2 Résultats des trois comparaisons entre IPK, les copies officielles et les prototypes nationaux.

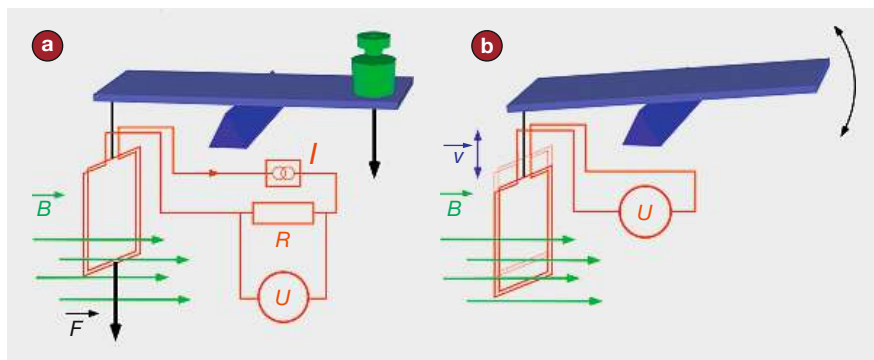


Figure 3 Représentation schématique du principe de fonctionnement de la balance du watt : phase statique ou de pesée (a) et phase dynamique ou d'induction (b).

Dans la phase dynamique, la bobine se déplace verticalement à une vitesse  $v$  dans le champ magnétique  $B$ . Le mouvement induit une tension  $U$  aux bornes de la bobine qui peut être exprimée par :

$$U = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = -\oint (d\vec{l} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} \quad (2)$$

En partant du principe que les dimensions de la bobine et le champ magnétique restent identiques dans les deux phases et sous l'hypothèse que, dans la phase dynamique, la bobine passe par la position que celle-ci avait dans la phase statique, la combinaison des deux phases permet d'éliminer le coefficient géométrique  $G$  :

$$G = \oint d\vec{l} \times \vec{B} \quad (3)$$

et conduit à l'expression :

$$UI = m g v \quad (4)$$

L'expérience se résume donc à une comparaison virtuelle entre la puissance

électrique ( $UI$ ) et la puissance mécanique ( $mgv$ ), d'où son nom « balance du watt ».

En faisant appel à l'effet Josephson [6], qui est en quelque sorte un convertisseur

universel fréquence/tension, et à l'effet Hall quantique [7] qui permet de définir une résistance électrique de façon universelle, l'équation (4) peut s'écrire :

$$m = C \cdot \frac{f_j \cdot f_j'}{g \cdot v} \cdot h \quad (5)$$

où  $C$  est un facteur d'étalonnage sans dimension,  $f_j$  et  $f_j'$  sont les fréquences Josephson utilisées dans les deux phases et  $h$  la constante de Planck. L'expérience de la balance du watt permet donc d'établir un lien direct entre l'unité de masse et la constante de Planck.

Il existe à ce jour 5 balances du watt opérationnelles réparties dans le monde (USA, Canada, France (2) et Suisse) qui sont utilisées pour déterminer avec grande précision la valeur de  $h$  en partant d'une masse  $m$  définie par IPK. Dès que l'incertitude sur la constante de Planck sera inférieure à quelques parts dans  $10^8$ , il sera possible d'inverser cette relation : en fixant la valeur de  $h$ , la balance du watt permettra de réaliser directement l'unité de masse et servira alors en quelque sorte de balance universelle.

### Exigences expérimentales

Pour atteindre une détermination de la constante de Planck avec l'incertitude requise, il est nécessaire de garantir que toutes les autres grandeurs qui interviennent dans la mesure possèdent des incertitudes inférieures à l'incertitude cible. Ainsi, le contrôle de la trajectoire de la bobine, sa vitesse  $v$  ou l'attraction terrestre  $g$  sont autant de paramètres qui doivent satisfaire des exigences strictes pour ne pas péjorer la qualité du résultat

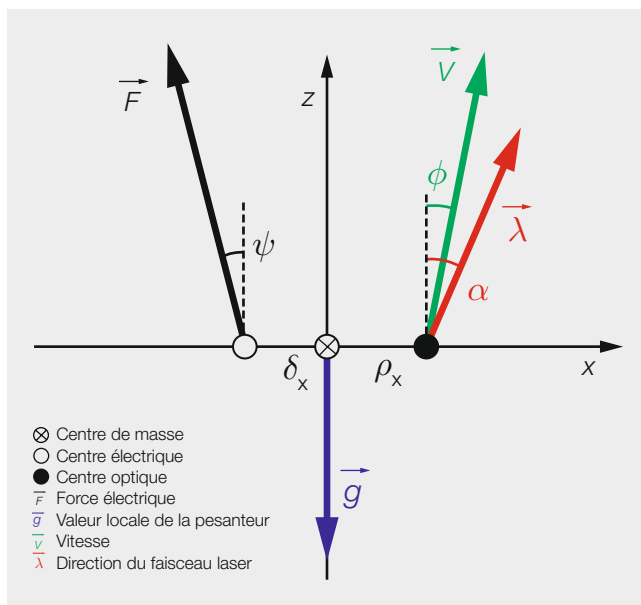
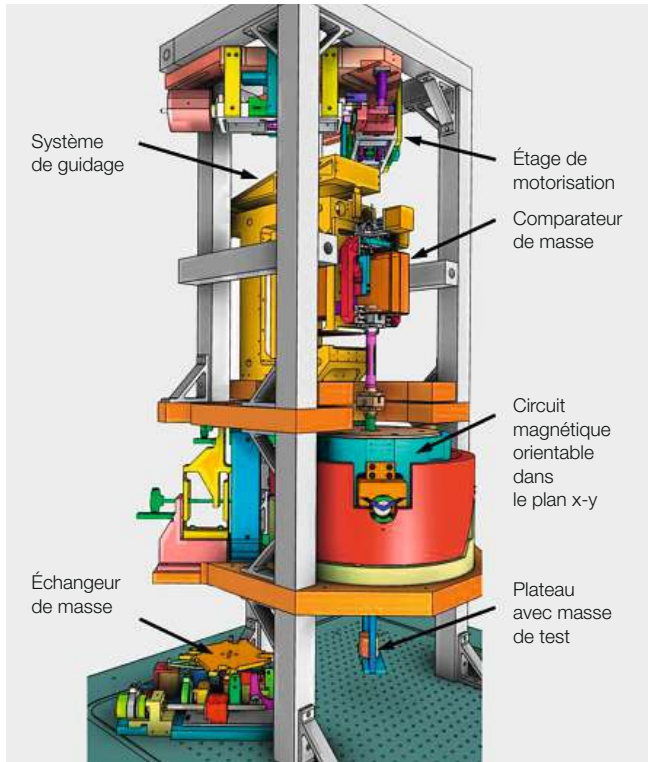


Figure 4 Paramètres qui doivent être alignés afin de satisfaire les exigences théoriques.



**Figure 5** Représentation schématique de la balance du watt « BWM II » de Metas.

final. C'est pour cette raison qu'un gravimètre absolu mesure la valeur de  $g$  en continu pendant l'expérience avec une erreur relative de quelques parts dans  $10^9$  et que les fréquences sont traçables à une référence issue des horloges atomiques.

Les paramètres principaux qui doivent impérativement être alignés lors des deux phases de l'expérience sont illustrés dans la **figure 4**. Lors de la phase de pesée, la force électrique  $\vec{F}$  doit être alignée avec la force mécanique qui est orientée dans le direction du champ local de pesanteur  $\vec{g}$ . La mesure du courant est réalisée à l'aide d'une résistance de référence aux bornes de laquelle la chute de tension est comparée à un standard de tension basé sur l'effet Josephson [8]. Cette résistance de référence est à son tour étalonnée contre une résistance de Hall quantique. La différence résiduelle entre le poids de la masse de test et la force électrique ainsi produite est alors mesurée à l'aide d'un comparateur de masse ou cellule de pesée.

Durant la phase dynamique, la bobine est entraînée à une vitesse  $\vec{v}$  le long de la verticale donnée par  $\vec{g}$ . Afin de minimiser l'influence des mouvements latéraux de la bobine, celle-ci doit être guidée le long de sa trajectoire avec une déviation inférieure au micromètre. La mesure de la vitesse est quant à elle effectuée avec un interféromètre laser dont l'orientation de faisceau  $\vec{\lambda}$  doit être alignée avec la trajectoire parcourue par la bobine. Tous les

angles représentés dans la **figure 4** doivent être inférieurs à approximativement  $100 \mu\text{rad}$  afin de garantir l'incertitude finale requise.

### Design de la nouvelle expérience Metas

Sur la base de l'expérience acquise au cours des dernières années, une nouvelle expérience a été conçue en étroite collaboration avec des partenaires externes. Le système de translation a été développé avec le laboratoire de robotique de l'EPFL, une cellule de pesée a été spécia-

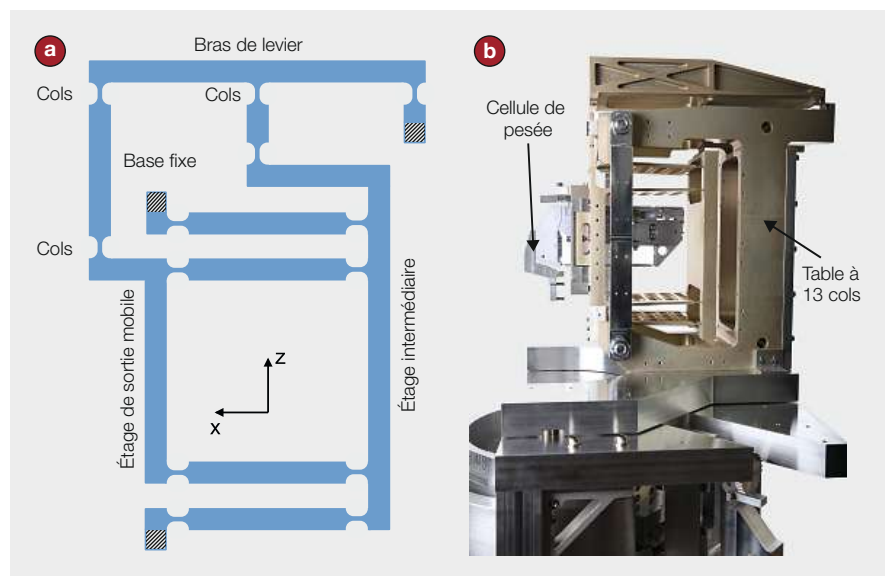
lement réalisée par Mettler-Toledo et un circuit magnétique de haute précision a été construit en collaboration avec le groupe Aimants permanents du Cern.

La vue d'ensemble de la nouvelle balance du watt de Metas, représentée par la **figure 5**, montre les composants principaux de l'expérience. Au sommet se trouve le système de motorisation qui induit le mouvement vertical de la bobine durant la phase d'induction. Vient ensuite l'étage de guidage dont le rôle consiste à maintenir la bobine sur un chemin purement vertical. La cellule de pesée, à laquelle est attachée la suspension, y est insérée. La suspension traverse quant à elle le circuit magnétique et supporte la bobine, ainsi que le plateau sur lequel vient se poser la masse de test.

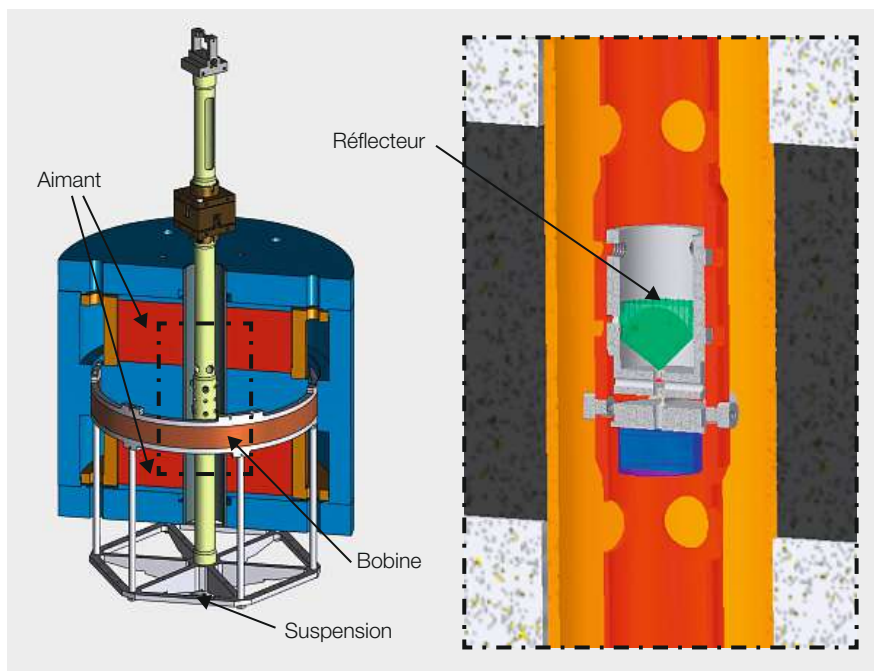
### Détails du système mécanique

Le système de guidage basé sur le principe d'une « table à 13 cols » est illustré par la **figure 6a**. Un monobloc d'aluminium usiné par électroérosion avec des épaisseurs de cols de l'ordre de  $150 \mu\text{m}$  atteint des performances telles qu'il permet le déplacement de la bobine le long d'une trajectoire de  $35 \text{ mm}$  avec un défaut de rectitude inférieur à  $200 \text{ nm}$  dans les deux directions [9].

La force résiduelle en phase statique est mesurée à l'aide d'une cellule de pesée intégrée dans le système de translation (**figure 6b**). Cet instrument permet la comparaison extrêmement précise (de l'ordre d'une part dans  $10^9$ ) de masses, et donc de forces, qui ont des valeurs nominales très proches.



**Figure 6** Représentation schématique de la table à 13 cols (a) et cellule de pesée intégrée dans le système de guidage monobloc (b).



**Figure 7** Le circuit magnétique est composé de l'aimant, de la bobine et de sa suspension. À l'intérieur du tube se trouve le réflecteur mobile de l'interféromètre.

Pour diminuer au maximum l'inertie de la masse en mouvement et éviter une sollicitation excessive des cols du système de guidage, la taille et la masse de la cellule ont été réduites au strict minimum. Pour éviter l'effet de la poussée d'Archimède et des corrections dues à l'indice de réfraction de l'air, toute l'expérience se déroule sous vide. Cette contrainte supplémentaire doit être prise en compte dans le développement de chaque élément du dispositif expérimental.

Une cellule satisfaisant les exigences mentionnées a été spécialement développée sur la base de la technologie monobloc par Mettler Toledo. Les tests spécifiques ont montré une répétabilité de l'ordre du microgramme, ainsi qu'un excellent comportement sous vide.

### Le circuit magnétique

Le concept de circuit magnétique retenu possède une géométrie cylindrique fermée (figure 7). L'avantage principal d'une telle géométrie réside dans son insensibilité aux champs magnétiques externes et dans sa tolérance aux erreurs d'alignement.

### Les aimants permanents

Le champ magnétique est produit par deux aimants permanents en samarium-cobalt-gadolinium (SmCoGd) en forme d'anneaux placés de chaque côté du noyau central avec les mêmes pôles face à face. Le centrage des

aimants avec le noyau central et le joug de retour est réalisé par deux anneaux de centrage en bronze. De cette manière, le parallélisme de l'entrefer, d'une largeur de 8 mm et d'une hauteur de 50 mm, est assuré à quelques  $\mu\text{m}$ . Le champ magnétique ainsi délivré dans l'entrefer est de 0,65 T avec une homogénéité verticale relative de  $10^{-5}$ .

Une contribution majeure à l'incertitude totale provient de la dépendance en température du champ magnétique. Le coefficient de température d'un aimant permanent classique en samarium-cobalt (SmCo) est de l'ordre de  $-360 \text{ ppm/K}$ . L'introduction d'une petite proportion de gadolinium dans le mélange (SmCoGd)

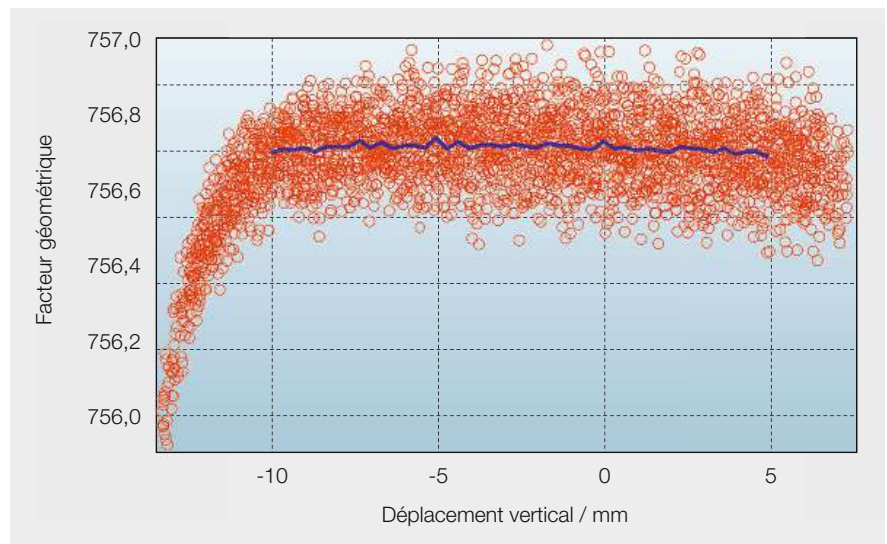
a permis de réduire cette dépendance à  $+10 \text{ ppm/K}$  tout en gardant un champ élevé. Afin d'aligner la force électrique, l'aimant est placé sur une plate-forme orientable qui permet d'effectuer les translations et rotations selon les axes concernés avec une résolution suffisante.

### La bobine

La bobine placée dans le champ magnétique est soutenue par une structure en céramique (Macor) solidaire du tube central. Ce tube est composé de deux parties reliées par un cardan en aluminium. La partie supérieure est crochée au comparateur alors que la partie inférieure traverse le circuit magnétique. À l'extrémité inférieure se trouve le plateau de pesée qui peut accueillir la masse de test.

Dans la phase statique, une force électromagnétique de 5 N est générée par un courant de 6,5 mA circulant dans les 1,2 km de fil de la bobine plongée dans un champ magnétique de 0,65 T. La bobine autoportante d'une résistance électrique de  $458 \Omega$  et d'une inductance de 1,23 H, possède un diamètre de 200 mm et comprend plus de 1800 spires. Sa rigidité est renforcée par deux anneaux en Macor et elle est reliée à l'hexagone de support par six pieds.

La vitesse de déplacement de la bobine dans la phase dynamique est mesurée à l'aide d'un interféromètre laser. L'élément optique mobile du bras de mesure de cet interféromètre est placé à l'intérieur du tube central à l'altitude de la bobine. Le faisceau laser est introduit dans le tube à l'aide d'un miroir fixe à  $45^\circ$  qui assure son alignement avec la direction verticale de déplacement. Une



**Figure 8** Mesures préliminaires du facteur géométrique  $G=U/v$  issu de la phase dynamique.

vitesse de déplacement typique de 1,3 mm/s suffit à générer une tension induite de 1 V aux bornes de la bobine.

### Résultats préliminaires

Une évaluation préliminaire du profil de champ a été effectuée par une série de mesures en phase dynamique de l'expérience. Dans cette phase, le coefficient géométrique  $G$  est constitué par le rapport entre la tension induite et la vitesse le long du chemin parcouru par la bobine (figure 8). La courbe bleue correspond à la valeur moyenne de 44 courbes (points rouges) et montre une région constante sur une distance de près de 15 mm avec une déviation standard de l'ordre de  $10^{-5}$ . La pente résiduelle autour du point de pesée est inférieure à 1 ppm/mm. Ces premiers résultats confirment la qualité attendue du circuit magnétique et satisfont pleinement les exigences fixées.

Dans un deuxième temps, le coefficient géométrique de la phase statique sera comparé à la valeur issue de cette courbe à la position de pesée. Connaissant la valeur de la masse de test, il sera alors possible de déterminer la valeur de la constante de Planck.

### Perspectives

Une nouvelle définition de l'unité de masse pourrait entrer en vigueur lors de la prochaine réunion de la conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 2018. Pour ce faire, plusieurs résultats expérimentaux indépendants devront être disponibles avant cette date pour permettre de fixer la valeur de la constante de Planck  $h$ . L'institut fédéral de métrologie prépare une campagne de mesures avec sa nouvelle balance du watt afin de participer activement à cette nouvelle définition.

### Références

- [1] G. Girard: The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992). *Metrologia*, Vol. 31, pp. 317-336, 1994.

- [2] A. Eichenberger, B. Jeckelmann, P. Richard: Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods. *Metrologia*, Vol. 40, pp. 356-365, 2003.
- [3] P. Becker: Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal. *Metrologia*, Vol. 40, pp. 366-375, 2003.
- [4] B. P. Kibble: A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method. *Atomic Masses and Fundamental Constants 5* (edited by J. H. Sanders and A. H. Wapstra), New York, Plenum Press, pp. 545-551, 1976.
- [5] A. Eichenberger, H. Baumann, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, W. Beer: Determination of the Planck constant with the Metas watt balance. *Metrologia*, Vol. 48, pp. 133-141, 2011.
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Josephson\\_voltage\\_standard](https://en.wikipedia.org/wiki/Josephson_voltage_standard)
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_Hall\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_Hall_effect)
- [8] S. P. Benz, C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, T. E. Harvey, L. A. Christian: Stable 1 Volt programmable voltage standard. *Appl. Phys. Lett.* 71, pp. 1866-1868, 1997.
- [9] F. Cosandier: Conception d'axes motorisés rectilignes d'ultra-haute précision. Phd Thesis, EPFL, 2013.

### Littérature complémentaire

- W. Nawrocki: Introduction to quantum metrology. Springer, ISBN 978-3-319-15669-9, 2015.

### Auteurs

Dr **Ali Eichenberger**, physicien, Dr ès sciences, est chef de projet de l'expérience de la balance du watt BWM II à l'Institut fédéral de métrologie Metas.

Institut fédéral de métrologie Metas, 3084 Wabern, [ali.eichenberger@Metas.ch](mailto:ali.eichenberger@Metas.ch)

Dr **Henri Baumann**, physicien, Dr ès sciences, est également chef de projet de l'expérience de la balance du watt BWM II à l'Institut fédéral de métrologie Metas.

Institut fédéral de métrologie Metas, 3084 Wabern, [henri.baumann@Metas.ch](mailto:henri.baumann@Metas.ch)

**Daniel Reber**, Dipl. El. Ing. ETH, est responsable du département Recherche et développement LC2 de Mettler-Toledo.

Mettler-Toledo AG, 8606 Nänikon, [daniel.reber@mt.com](mailto:daniel.reber@mt.com)

Dr **Davide Tommasini**, ingénieur, Dr ès sciences, est responsable de la section Aimants à conduction normale du Cern.

Cern, 1217 Meyrin, [davide.tommasini@Cern.ch](mailto:davide.tommasini@Cern.ch)

## Zusammenfassung

### Die Watt-Waage

#### Auf dem Weg zu einer Neudefinition des Kilogramms

Das Kilogramm, von dem alle elektrischen Einheiten abhängen, ist das letzte Element im Internationalen Einheitensystem SI, das noch auf einem materiellen Artefakt basiert: dem Internationalen Kilogrammprototypen IPK. Bei Vergleichen zwischen dem IPK und seinen offiziellen Kopien über die letzten hundert Jahre hinweg wurde jedoch die Instabilität des Systems eindeutig nachgewiesen. Das Watt-Waagen-Experiment, mit dessen Hilfe eine Verbindung zwischen der Masseneinheit und der Planckschen Konstante geschaffen werden kann, stellt einen vielversprechenden Ansatz im Hinblick auf eine Neudefinition des Kilogramms dar.

Das Funktionsprinzip der Watt-Waage besteht aus zwei Phasen: der statischen Phase oder Wägephase und der dynamischen Phase oder Induktionsphase. Während der statischen Phase wird das Massegewicht durch eine elektromagnetische Kraft ausgeglichen, die durch Strom erzeugt wird, der in einer Spule fliesst, die sich in einem Magnetfeld befindet. Während der dynamischen Phase wird die Spule vertikal durch dieses Magnetfeld bewegt. Dies induziert an den Anschlussklemmen der Spule eine Spannung. Sofern bestimmte Bedingungen erfüllt sind, ist es also möglich, die elektrische und mechanische Leistung zu vergleichen, daher auch die Bezeichnung «Watt-Waage».

Dieses Experiment wird in verschiedenen Ländern angewendet, um zunächst mithilfe der nationalen Kilogrammprototypen die Plancksche Konstante mit einer relativen Unsicherheit in einer Grössenordnung von wenigen Millionstel Prozent zu bestimmen. Ist der Wert der Planckschen Konstante bestimmt, kann mit der Watt-Waage eine Neudefinition des Kilogramms mit derselben relativen Unsicherheit vorgenommen werden. In diesem Artikel werden die Einzelheiten dieses Experiments dargestellt sowie die Herausforderungen für die Wissenschaftler des Eidgenössischen Instituts für Metrologie (Metas), um ein solches Präzisionsniveau zu erreichen.

CHe