



P. PINOT

Prototype du kilogramme et constante physique fondamentale : la dissémination de l'unité de masse

Prototype of the kilogram and fundamental physical constant: The dissemination of the unit of mass

Patrick PINOT¹, Gérard GENEVES² et Marc HIMBERT¹

Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM)

¹ Cnam, 61 Rue du Landy, 93210 La Plaine Saint-Denis, France, patrick.pinot@cnam.fr.

² LNE, 29 Avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes Cedex, France.

Résumé

Le kilogramme est encore défini à partir d'un objet matériel, le prototype international du kilogramme sanctionné par la 1^{re} CGPM en 1889. Il présente trois inconvénients majeurs : disponible en un seul lieu, non pérenne en termes de masse physique et non universel puisque basé sur un artefact. La définition de l'unité de masse pourrait être changée au plus tôt en 2011 et serait alors basée sur une valeur fixée exactement d'une constante fondamentale de la nature. Ainsi, la possibilité de redéfinir le kilogramme en fonction d'une réelle invariance naturelle est en discussion depuis environ 30 ans. Dans ce contexte, la métrologie française a entrepris depuis 2002 la réalisation d'une expérience de balance du watt dont l'objectif est de raccorder le kilogramme à la constante de Planck. L'adoption d'une nouvelle définition du kilogramme basée sur une constante physique fondamentale ou atomique devra prendre en compte sa dissémination en évitant tout bouleversement dans la pratique des laboratoires accrédités et de la plupart des utilisateurs. Mais elle aura inévitablement des conséquences sur les étalons de transfert utilisés par les laboratoires nationaux de métrologie.

MOTS CLÉS : ÉTALONS, UNITÉS DE MESURE, KILOGRAMME, BALANCE DU WATT, MONOCRISTAL DE SILICIUM, CONSTANTE DE PLANCK, CONSTANTE D'AVOGADRO, DISSÉMINATION.

Abstract

The kilogram is still defined in terms of an artefact, namely, the same prototype sanctioned by the 1st CGPM in 1889. It has three main

limitations: available in one place, not really invariant in terms of physical mass and not universal as based on an artefact. The definition of the mass unit could be revised as early as 2011 by basing it on exactly fixed value of a fundamental constant of nature. Thus, the possibility of redefining the kilogram in function of a true natural invariant has been discussed for about 30 years. In this context, the French metrology decided in 2002 to undertake the realisation of a watt balance experiment aiming at linking the kilogram to the Planck constant. The adoption of a new definition of the kilogram based on an atomic or a fundamental physical constant has to take its dissemination into account by avoiding great change for the accredited institutes and most of users. Of course, this will have consequences for the transfer mass standards used by the National Institutes of Metrology.

KEY WORDS: REFERENCES AND STANDARDS, UNITS OF MEASUREMENT, KILOGRAM, WATT BALANCE, SILICON SINGLE CRYSTAL, PLANCK CONSTANT, AVOGADRO CONSTANT, DISSEMINATION.

1. Introduction

La masse est une grandeur physique dont l'approche expérimentale est non ambiguë, même si, sur le plan théorique, les débats entre physiciens théoriciens sur la nature de cette grandeur ne sont pas clos. La masse intervient dans deux phénomènes conceptuellement différents : l'inertie et la gravité, unifiées par le principe

d'équivalence, qui postule que le rapport de la masse inertielle à la masse gravitationnelle d'un corps est égal à 1.

Pour les métrologues, la masse est une grandeur physique mesurable, scalaire et additive; la définition de l'unité associée à la masse, le kilogramme, fait l'objet d'un intérêt tout particulier, en raison des singularités de cette définition. En effet, le kilogramme est la seule des sept unités de base du Système international d'unités (SI) qui soit encore directement définie par un étalon matériel : le prototype international du kilogramme.

Cet étalon est un cylindre dont le diamètre est égal à sa hauteur (39 mm, ce qui minimise sa surface extérieure). Il est fait de platine allié à de l'iridium pour 10 % de la masse. Depuis plus d'un siècle, il est conservé dans l'air sous une triple cloche, dans un caveau du Bureau international des poids et mesures (BIPM) à Sèvres (France); par définition sa masse vaut un kilogramme exactement.

Nous allons d'abord rappeler l'origine de la définition actuelle de l'unité de masse qui correspond également à sa « mise en pratique » (Sect. 2), puis décrire la structure de la chaîne nationale d'étalonnage (Sect. 3), avant d'examiner la problématique induite par cette définition. Ensuite, nous présenterons le principe des deux principales expériences (monocristal de silicium et balance du watt) (Sect. 4) dont le but est d'aboutir à une nouvelle définition de l'unité de masse par l'établissement d'une relation entre le kilogramme et une constante physique fondamentale, en l'occurrence la constante d'Avogadro et la constante de Planck. La métrologie française s'est engagée dans une de ces expériences permettant de relier la constante de Planck à l'étalon de masse.

Nous décrirons ensuite les préalables à satisfaire avant d'adopter une nouvelle définition de l'unité de masse basée sur une constante fondamentale, ainsi que les conséquences d'une telle définition pour la « mise en pratique » de l'unité (Sect. 5).

Enfin, nous examinerons les implications d'un tel changement de définition pour les futurs étalons de transfert et pour la traçabilité dans la dissémination de l'unité de masse (Sect. 6).

2. Un peu d'histoire

2.1. Les prémices de systèmes nationaux d'unités de « poids » [1]

En Europe et autour du bassin méditerranéen, l'empire romain d'occident introduisit comme unité de « poids » la « libra » (livre romaine valant environ 327 g), appartenant à l'un des premiers systèmes non décimaux d'unités communs à plusieurs peuples. Mais, après l'effondrement de cet empire, de multiples systèmes locaux de poids et mesures resurgirent et perdurèrent. Au 9^e siècle, Charlemagne tenta d'unifier par la loi tous les systèmes existant dans l'empire sur lequel il régnait, mais celle-ci ne fut pas réellement appliquée.



Fig. 1. – Une pile de Charlemagne et le kilogramme en platine de l'an 7 (1799).

C'est avec le développement du commerce entre les grands royaumes des 15^e et 16^e siècles qu'apparurent la nécessité et une réelle volonté de définir des systèmes de poids et mesures utilisables dans une contrée étendue.

En France, à la fin du 15^e siècle, apparut la « pile » dite « de Charlemagne » (Fig. 1) (elle aurait été fabriquée à partir d'étalons remontant à Charlemagne). Elle définissait la livre appelée « poids de marc » (environ 490 g) et ses sous-multiples non décimaux : la livre des poids de marc se subdivisait en 2 marcs, le marc en 8 onces, l'once en 8 gros, le gros en 3 deniers et le denier en 24 grains. En Angleterre, à la fin du 16^e siècle, la reine Elizabeth 1^{re} choisit comme unité de « poids » la livre appelée « aver-depois » (nom provenant de l'expression française « avoir du poids », environ 453 g), divisée en 16 onces. Ces systèmes royaux ne furent utilisés que pour le commerce des matières précieuses, souvent liées aux monnaies.

À partir du 17^e et surtout du 18^e siècle, alors qu'il existait dans un même pays une multitude d'unités de mesure différentes selon le lieu, ou même la nature de la denrée considérée, des savants commencèrent à rechercher un système d'unités plus homogène et universel, en raison du développement du commerce, de l'industrie, mais aussi des sciences.

2.2. Naissance du système métrique et du kilogramme

C'est en 1791 en France, dans l'élan révolutionnaire, que l'Assemblée nationale vota le principe d'un système décimal de poids et mesures basé sur une unité de longueur. On opta rapidement pour lier cette unité à la longueur du méridien terrestre, plutôt qu'à celle du pendule battant la seconde.

En 1792, on donna le nom de « mètre » à la future unité de longueur, tandis que Delambre et Méchain commençaient les mesures par triangulation du méridien de Dunkerque à Barcelone pour déterminer sa valeur. Leurs travaux ne furent achevés qu'en 1798.



Fig. 2. – Le Kilogramme des Archives.

Le décret-loi de la Convention nationale du 1^{er} août 1793 adopta le mètre comme unité de longueur égale à la dix-millionième partie du quart nord du méridien terrestre et le grave comme unité de « poids » égale au « poids » d'un décimètre cube d'eau à la température de la glace fondante. Lavoisier et Haüy furent chargés de réaliser cette nouvelle unité de masse. Enfin, la loi du 18 Germinal an III (7 avril 1795) créa le système métrique décimal et ordonna la réalisation d'un mètre étalon en platine.

Cette même année, pour des raisons pratiques, le « gravet » (millième partie du « grave ») fut choisi comme unité courante de « poids » et prit le nom de « gramme », mot venant du grec « gramma » qui signifie « signe écrit ». Le rapport avec la masse proviendrait d'une mauvaise traduction du mot latin « scrupulum », faite par les Grecs à l'époque de l'empire romain (le « scrupulum » étant une unité divisionnaire romaine de masse correspondant à un poids d'un vingt-quatrième d'once).

En 1799, les travaux du français Lefèvre-Gineau et de l'italien Fabbroni conduisirent à définir l'unité de « poids » égale à la masse d'un décimètre cube d'eau distillée prise, non pas à 0 °C, mais à 4 °C correspondant au maximum de densité du liquide. Cette unité (différente du « grave » et valant environ 1 000 gravets ou grammes) prit alors le nom de kilogramme. C'est donc à cette époque qu'on attribua à l'unité de masse un nom singulier en ce sens qu'il comprend un préfixe, normalement destiné à désigner les multiples de l'unité.

La réalisation pratique de ce kilogramme n'est pas simple. Un étalon matériel de référence fut fabriqué en platine pur. Il a été déposé aux Archives nationales. Il est connu sous le nom de « Kilogramme des Archives » [2] (Fig. 2).

2.3. Le prototype international du kilogramme

C'est en 1870 que la première Commission internationale du mètre, réunie à Paris, entreprit des travaux en

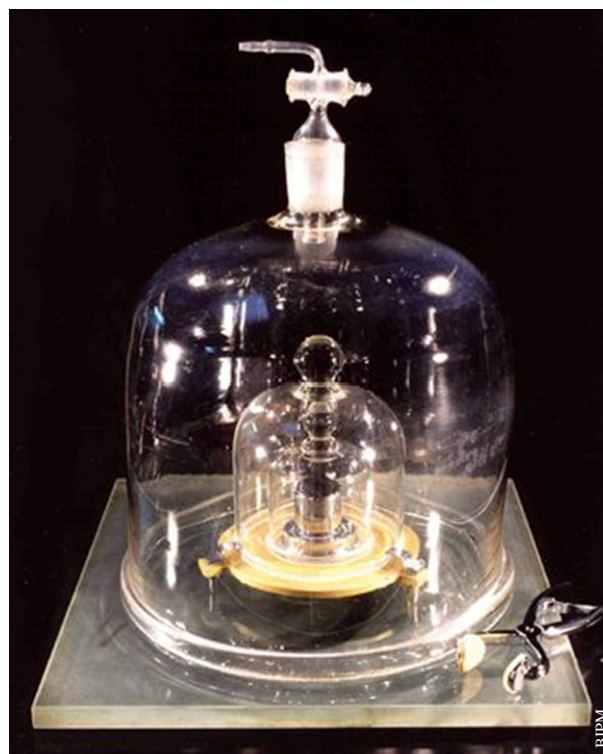


Fig. 3. – Le prototype international du kilogramme conservé dans l'air sous une triple cloche en verre.

vue de réaliser un étalon international du kilogramme identique autant que possible au Kilogramme des Archives.

Le chimiste Sainte-Claire Deville proposa en 1874 d'utiliser un alliage de platine allié à 10 % d'iridium, qui présentait une dureté suffisamment élevée et un coefficient de dilatation thermique assez faible. Les métallurgistes du Conservatoire des arts et métiers élaborèrent les premières coulées de platine et d'iridium en vue de réaliser des prototypes, mais l'examen de ces coulées révéla des défauts potentiels et elles ne furent pas retenues. C'est la société anglaise Johnson Matthey and Co qui réalisa finalement l'alliage et fabriqua en 1878 trois cylindres en platine iridié de 1 kg identifiés KI, KII et KIII.

KIII ayant la masse la plus proche de celle du Kilogramme des Archives, le Comité international des poids et mesures (CIPM), créé lors de la signature en 1875 de la Convention du mètre, décida en 1883 de choisir KIII comme prototype international du kilogramme et de l'identifier par la lettre \mathcal{K} . Le prototype est depuis conservé au pavillon de Breteuil à Sèvres, siège du Bureau international des poids et mesures (BIPM) également créé en 1875. On réalisa, à partir de 1884, une quarantaine de copies en platine iridié du prototype international du kilogramme.

En 1889, la première Conférence générale des poids et mesures (CGPM), organe délibératif de la Convention du mètre, sanctionna le prototype du kilogramme adopté par le CIPM et attribua par tirage au sort les copies du prototype aux pays signataires du traité [3]. C'est ainsi

que la France a obtenu l'étalon n° 35 : c'est encore de nos jours la référence nationale d'unité de masse [4]. Enfin, la 3^e CGPM (1901) précisa la définition de l'unité de masse comme suit :

« Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. »

Depuis plus d'un siècle, l'unité de masse est donc définie à partir d'un étalon matériel conservé au BIPM. Elle reste la seule des sept unités de base du Système international d'unités (SI) dont la définition repose encore aujourd'hui sur une réalisation matérielle.

Les conditions de la dissémination de la référence jusqu'aux utilisateurs sont rappelées dans la section 3.

3. Les étalons de masse

3.1. La chaîne nationale d'étalonnage des masses

3.1.1. Le prototype national et les étalons de transfert

Au sommet de la chaîne nationale d'étalonnage des masses, la France dispose du prototype national du kilogramme n° 35, étalonné en 1889 et raccordé tous les cinquante ans environ au prototype international à l'occasion des vérifications internationales des prototypes nationaux (après 1945 et vers 1988–1992) [5, 6]. Le raccordement est effectué par l'intermédiaire de copies du prototype international exclusivement utilisées à cet effet. Les masses matérialisées par les prototypes nationaux sont obtenues après application d'un nettoyage-lavage spécifique : elles sont fournies par le BIPM avec une incertitude type de l'ordre de 2 µg, soit 2×10^{-9} en valeur relative.

La garde et la conservation du prototype français et la responsabilité du transfert de l'unité de masse aux utilisateurs font partie des missions attribuées, par la Métrologie française, au laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM).

Le prototype français présente une dérive positive quasi linéaire à long terme de l'ordre de 1 µg par an par rapport au prototype international, dont la masse est invariante par définition. Il suit en fait l'évolution moyenne de l'ensemble des prototypes nationaux. Afin de préserver autant que possible sa stabilité (ou à tout le moins la stabilité de sa dérive), l'usage du prototype national doit être strictement limité. En effet, toute utilisation du prototype peut entraîner des variations notables de la masse qui se répercuteraient sur l'ensemble de la chaîne nationale d'étalonnage. C'est pourquoi il est nécessaire de disposer d'un ensemble organisé d'étalons de transfert, raccordés avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} . Pendant la longue période qui sépare deux vérifications internationales successives, des comparaisons intra- et interlaboratoires d'étalons de transfert permettent de garantir la stabilité des références.

L'ensemble des raccordements sont effectués dans l'air : il est indispensable à ce degré d'exactitude d'appliquer une correction pour tenir compte de la poussée

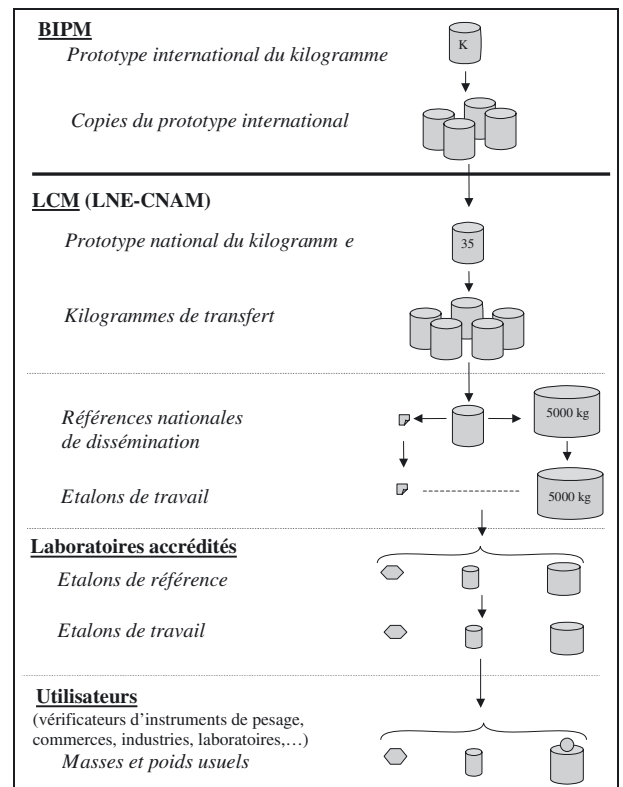


Fig. 4. – Schéma de la chaîne française d'étalonnage des masses.

d'Archimède due à l'air [7–10]. Dès que des étalons sont réalisés dans des matériaux de masse volumique différente de celle de l'alliage Pt-Ir, la contribution de l'incertitude de cette correction, augmente de manière significative la valeur de l'incertitude d'étalonnage. L'article [11], bien qu'un peu obsolète, précise les corrections à prendre en compte et l'organisation minimale à mettre en place pour maintenir les étalons de transfert à leur plus haut niveau d'exactitude.

3.1.2. Les étalons de référence et de travail (multiples et sous-multiples du kilogramme)

L'établissement complet de la chaîne d'étalonnage des masses fait intervenir une succession d'étalons hiérarchisés en fonction de leur qualité métrologique et de l'incertitude sur la connaissance de leur masse. La responsabilité pratique du maintien de cette chaîne est répartie entre plusieurs laboratoires ou organismes qui interviennent en fonction du niveau d'exactitude exigé.

En France, comme le montre schématiquement la figure 4, le LCM réalise à partir des kilogrammes de transfert le raccordement des références nationales de dissémination dans l'étendue 100 µg–5 000 kg. Ces références permettent de raccorder les étalons de référence des laboratoires accrédités par le Comité français d'accréditation (Cofrac).

Pour la majorité des utilisateurs (parmi lesquels on trouve les vérificateurs d'instruments de pesage) les étalonnages sont effectués en « masse conventionnelle ». La



Fig. 5. – Un kilogramme en acier inoxydable monobloc du type OIML de classe E₁ ou E₂.

masse conventionnelle a été introduite pour les besoins de la métrologie légale [12, 13] : ce concept permet aux utilisateurs d'éviter d'appliquer une « correction de poussée de l'air » spécifique dès que la classe d'exactitude des étalons de masse (alors appelés « poids » en métrologie légale) utilisés est compatible avec le niveau d'incertitude recherchée. La recommandation internationale R111 de l'Organisation internationale de métrologie légale (OIML) définit la classe d'exactitude de ces « poids » en fonction de leur tolérance d'ajustage ou « erreur maximale tolérée » (EMT).

Par exemple, un laboratoire accrédité devant étalonner des poids de 1 kg dont la tolérance d'ajustage est ± 5 mg (classe d'exactitude dite F1) doit disposer de poids de travail dont la tolérance d'ajustage est de $\pm 1,6$ mg (classe d'exactitude dite E₂) [12] raccordés avec une incertitude type relative de $2,5 \times 10^{-7}$ (mieux que le tiers de l'EMT). Ces poids de travail E₂ sont eux-mêmes raccordés à des poids de référence d'exactitude meilleure (classe la plus élevée E₁), pour lesquels (voir Fig. 5) l'erreur maximale tolérée par rapport à la masse nominale de 1 kg doit rester dans l'intervalle $\pm 5 \times 10^{-7}$ en valeur relative et l'étalonnage doit présenter une incertitude type composée relative inférieure à $8,3 \times 10^{-8}$. Les laboratoires nationaux de métrologie doivent donc disposer d'étalons de transfert raccordés avec une incertitude type relative de l'ordre de 10^{-8} ...

La stabilité à long terme d'un étalon de masse repose principalement sur les caractéristiques intrinsèques du matériau utilisé pour réaliser l'étalon, sur le processus de fabrication de l'étalon, sur la méthode de nettoyage appliquée et sur les conditions de conservation et d'utilisation de l'objet.

3.2. Critères de choix du matériau

Les principaux critères de choix d'un matériau pour la fabrication d'un étalon de masse de référence

nationale reposent sur l'optimisation des caractéristiques suivantes :

- une homogénéité aussi complète que possible (en particulier absence de porosités, de cavités et d'inclusions) afin de réduire les phénomènes de dégazage et d'absorption ;
- une résistance élevée aux altérations chimiques (telles que corrosion, oxydation ou réaction aux principaux solvants de nettoyage) ;
- une masse volumique élevée pour réduire la surface active (limitation des échanges superficiels avec l'air et les polluants ambiants) et réduire la correction différentielle de poussée de l'air ;
- une faible susceptibilité magnétique (inférieure à 0,01) et un moment magnétique négligeable (inférieur à $1 \mu\text{T}$) afin d'être peu sensible aux champs magnétiques environnants et à l'influence d'objets ou instruments ayant des propriétés magnétiques ;
- une dureté élevée pour obtenir un état de surface avec une très faible rugosité (réduction de la surface active), pour réduire les risques d'usure mécanique au cours des manipulations et pour faciliter le nettoyage ;
- un faible coefficient de dilatation thermique et une bonne conductivité thermique pour minimiser les effets liés au contrôle de la température (meilleure connaissance du volume de l'étalon et donc de la correction de poussée de l'air) ;
- une bonne conductivité électrique afin d'éviter l'accumulation de charges électrostatiques (réduction des forces électrostatiques parasites).

La forme retenue pour les étalons de masse au niveau d'exactitude le plus élevé tend à minimiser leur surface. Une sphère parfaite étant difficile à réaliser et à manipuler, le choix s'est porté sur une forme cylindrique dont la hauteur est égale au diamètre, offrant ainsi une surface minimale pour un cylindre droit.

Les étalons nationaux de transfert ayant la plus faible incertitude d'étalonnage sont en platine iridié, comme les prototypes international et national. Mais, du fait de la faible dureté de l'alliage (inférieure à 180 Vickers ou HV), la surface de ces étalons peut être facilement altérée lors de leur manipulation. Des étalons de transfert d'usage courant ont été réalisés à partir d'alliages plus durs. En France, deux superalliages ont été choisis : dans les années 1980 un superalliage à base de cobalt, connu sous le nom commercial de Alacrite XSH [14] ; et plus récemment un superalliage à base de nickel issu des derniers progrès de la métallurgie, ayant pour nom commercial Udimet 720 [15, 16]. La réalisation des premiers étalons de dissémination de 1 g à 10 kg en Udimet 720 du LCM est terminée.

Pour les usages en métrologie légale, la recommandation R111 de l'OIML spécifie, selon la classe d'exactitude des poids, les caractéristiques du matériau, l'état de surface, la forme, le marquage, la tolérance d'ajustage de la masse... Par exemple, les poids de classe E₁ ou E₂

doivent être réalisés en utilisant les meilleurs aciers inoxydables austénitiques présentant une masse volumique aussi proche que possible de $8\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, valeur retenue pour la définition de la masse conventionnelle [12, 13].

3.3. Stabilité des étalons de masse

La stabilité des étalons de masse dépend fortement de leur état de surface (qui conditionne leur surface active), de leurs conditions de conservation (ils sont conservés dans l'air pour des raisons pratiques), mais aussi de la méthode de nettoyage utilisée. En effet, les contaminants d'une surface métallique sont d'origine et de nature très diverses. Il est important d'éliminer autant que possible ceux qui provoquent des variations de masse non maîtrisables ou non modélisables.

Les principaux phénomènes affectant la stabilité des étalons de masse sont les suivants :

- la contamination de surface due, par exemple, aux poussières adhérentes ou à l'adsorption et à la désorption d'eau ;
- les altérations chimiques dues, par exemple, à la corrosion ou à l'oxydation ;
- l'usure mécanique provoquant, par exemple, des rayures et piqûres qui augmentent la surface active et piègent les contaminants ;
- le dégazage des gaz occlus lors du processus métallurgique, par exemple, le monoxyde de carbone ou l'hydrogène.

Il est essentiel pour la stabilité d'un étalon de masse que sa surface soit la plus lisse possible. On cherche lors de la finition de surface à atteindre un poli « miroir » dont la hauteur quadratique moyenne des fluctuations de position de surface est inférieure à 10 nm pour les étalons nationaux de transfert.

De nombreux travaux ont permis d'optimiser le choix des matériaux, d'améliorer le processus de finition de surface (technique de polissage [17, 18]) et de déterminer l'influence des méthodes de nettoyage [19] et des conditions de conservation [20–22].

La participation à des comparaisons internationales d'étalons de masse et la réalisation régulière de comparaisons directes entre étalons de transfert permettent en outre :

- de vérifier la cohérence interne de la valeur d'étalonnage de ces étalons ;
- de contrôler la stabilité des références nationales ;
- de garantir la validité et la traçabilité de l'étalonnage des références nationales de dissémination des sous-multiples et multiples du kilogramme.

À cet égard, la proximité géographique du BIPM place la France dans une situation très favorable pour mener à bien les études sur la stabilité du kilogramme.

4. Problématique de l'unité de masse

4.1. Disponibilité, pérennité et universalité

Le prototype international du kilogramme représente à la fois la définition et la réalisation pratique de l'unité de masse ; cet état de fait renvoie à une triple problématique :

- la dissémination est rendue délicate par l'unicité de la référence, plus précisément par sa disponibilité en un seul lieu. Pour effectuer les vérifications des quelques soixante prototypes nationaux répartis dans le monde, il faut rassembler ceux-ci au BIPM pour une durée de 2 ou 3 ans, le temps d'effectuer l'ensemble des raccordements. C'est pourquoi une telle vérification n'est réalisée que tous les 50 ans environ ;
- la maintenance est complexe : il s'agit de maîtriser les conditions de conservation du prototype international et de contrôler sa stabilité à long terme. Malgré les précautions prises, on ne peut empêcher la contamination de surface, alors que sa masse vaut, par définition, exactement un kilogramme. Le prototype international a été nettoyé en 1946 pour la deuxième vérification des prototypes nationaux et en 1988 pour la troisième vérification [5] en appliquant une méthode de nettoyage-lavage utilisant des solvants (éther, éthanol et eau). La définition du kilogramme doit donc être considérée comme étant la masse du prototype international après application d'un nettoyage-lavage du « type BIPM » [23]. Ce même processus de nettoyage-lavage est appliqué aux prototypes nationaux ;
- la définition même pose les limites de l'universalité dans l'espace et dans le temps de cette unité. Si le prototype international venait à être endommagé ou détruit, on pourrait choisir l'une de ses copies pour redéfinir l'unité de masse, mais ce nouveau kilogramme, exact par définition, serait inévitablement différent de l'ancien de l'ordre de 10^{-7} en valeur relative dans le meilleur des cas, et en outre la continuité ne serait garantie qu'à l'échelle du microgramme. Ce serait un écart significatif au regard des incertitudes nécessaires à la métrologie des masses (c'est à dire 10^{-8} en valeur relative). La définition actuelle ne nous permet donc pas de transmettre aux générations futures les éléments permettant de reproduire à l'identique la même unité de masse.

Une des difficultés majeures rencontrées tient à la dérive relative du prototype international du kilogramme par rapport à un ensemble de prototypes nationaux ou témoins de même nature. Les valeurs obtenues depuis plus de 100 ans ont mis en évidence une dérive différentielle relative de 3×10^{-8} et une dispersion des valeurs des prototypes nationaux et témoins de l'ordre de 1×10^{-7} , montrant ainsi la fragilité de la définition actuelle de l'unité de masse.

4.2. Raccordement à une constante physique fondamentale

Pour pallier ces difficultés, en fait très imbriquées, on peut chercher à raccorder l'unité de masse à une ou

plusieurs constantes physiques fondamentales ou à des constantes de la nature, le cas échéant à l'échelle atomique [24, 25]. Le souhait d'universalité de la définition des unités de mesure n'est pas nouveau : depuis le 18^e siècle, les savants ont préconisé de définir des unités naturelles et universelles. En 1870 Maxwell suggérait d'utiliser des unités définies à partir des propriétés intrinsèques des atomes ou molécules [26].

Depuis près d'une trentaine d'années les recherches en ce sens ont connu un regain d'activités. Plusieurs laboratoires nationaux de métrologie de pays très industrialisés ont entrepris des études ayant pour objectif de réaliser un tel raccordement avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} [24, 27]. Un niveau d'incertitude aussi exigeant peut seul garantir la continuité historique pour les utilisateurs d'étalons de masse, en particulier, pour qu'un changement de définition de l'unité de masse n'induisse pas d'écart significatif sur la valeur des étalons des classes d'exactitude les plus élevées de la métrologie légale.

Ces travaux ont été encouragés par les résolutions successives prises par la CGPM en 1995, 1999 et 2007 incitant les laboratoires nationaux de métrologie « à entreprendre des études visant à contrôler la stabilité des étalons de masse et susceptible de déboucher, à terme, sur une nouvelle définition du kilogramme ». L'idée est de mesurer, dans un premier temps, une constante physique fondamentale ou une constante de la nature à partir d'une masse macroscopique raccordée au prototype international, avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} .

Plusieurs approches sont envisagées. Les diverses expériences en cours reposent sur des principes physiques variés : utilisation de dispositifs électromécaniques [28], accumulation d'ions [29], analyse d'un monocristal de silicium [30]... Elles présentent aujourd'hui des performances assez inégales. Deux méthodes expérimentales très prometteuses (analyse d'un monocristal de silicium et balance du watt) mobilisent de nombreux chercheurs et nécessitent des moyens d'étude importants. L'expérience française de balance du watt est la voie soutenue par la métrologie française depuis 2002.

4.2.1. Étude d'un monocristal de silicium

Cette expérience consiste à mesurer la valeur de la constante d'Avogadro N_A en déterminant le rapport entre le volume molaire V_m et le volume atomique V_a d'un cristal. Le volume molaire est le produit de la masse molaire M_{Si} du silicium et du volume V du cristal, divisé par la masse m de celui-ci. Le volume atomique est, dans un monocristal cubique où l'on note d_{220} la distance entre les plans (220) du réseau cristallin, le volume d'une maille divisé par le nombre d'atomes n par maille. On obtient :

$$N_A = \frac{V_m}{V_a} = \frac{n \cdot M_{Si} \cdot V}{m \cdot (\sqrt{8} \cdot d_{220})^3} \quad (1)$$

Les premiers travaux réellement importants pour la détermination de N_A à partir d'un monocristal de silicium

ont commencé dès les années 1970 avec l'utilisation d'une technique XRCD (*X-ray crystal density measurement*). Becker a publié en 2001 un article décrivant un historique très complet de la détermination de cette constante [31].

L'une des difficultés majeures est de réaliser un monocristal de masse macroscopique (pour pouvoir effectuer un raccordement de la masse de haute exactitude) présentant une structure aussi parfaite que possible. Une forme sphérique pour l'objet confère de la robustesse et donne accès au volume avec une incertitude faible. Il faut également mesurer la masse molaire de l'élément constitutif, ainsi que la masse et le volume de cet artefact. Il faut enfin déterminer le paramètre de maille et le nombre d'atomes par maille.

Le choix du silicium résulte du niveau de développement technologique sans égal effectué par l'industrie des semi-conducteurs pour cet élément. Cependant le silicium naturel est constitué de trois isotopes, et les mesures de masse molaire effectuées par spectrométrie de masse sur du silicium naturel ont été obtenues avec une incertitude relative de $1,4 \times 10^{-7}$; la dispersion observée a montré que des biais non négligeables peuvent se manifester. C'est donc la construction d'un monocristal en silicium enrichi en isotope le plus naturellement abondant qui a été entrepris. Par ailleurs la maille du silicium est de type diamant, cubique à faces centrées (CFC) ; en pratique, elle présente des lacunes ou contient des impuretés substitutionnelles ou interstitielles, qui entraînent des dislocations du réseau cristallin dont il faut évaluer la proportion, et modifient le nombre moyen d'atomes par maille.

Une telle expérience est en cours d'achèvement. Elle requiert des compétences pluridisciplinaires, des moyens peu communs pour la fabrication de sphères en monocristal de silicium et des techniques lourdes de caractérisation. Elle a nécessité le regroupement d'équipes dans le cadre d'un large consortium international. Elle conduira prochainement à une incertitude relative proche de 10^{-8} pour la détermination de la constante d'Avogadro.

4.2.2. Balance du watt

L'expérience de la balance du watt repose sur le principe d'une comparaison indirecte de puissances virtuelles mécanique et électrique. Elle a été imaginée en 1976 par l'anglais Kibble [32]. L'expérience se déroule en deux phases, l'une dite statique, l'autre dynamique.

Dans la phase statique, on compare au moyen d'un fléau de balance le poids engendré par une masse m soumise à l'accélération locale de la pesanteur g (une force d'origine mécanique) et la force de Laplace exercée sur un circuit électrique placé dans un champ magnétique (la composante verticale d'une force d'origine électromagnétique). Dans le cas simple d'un conducteur rectiligne de longueur l , parcouru par un courant I , placé dans un champ d'induction B constant et homogène de telle sorte que la force de Laplace s'exerce sur celui-ci soit

verticale, l'équilibre de la balance, moyennant quelques hypothèses de configuration géométrique parfaite, se traduit par l'équation :

$$m \cdot g = I \cdot l \cdot B \quad (2)$$

L'exactitude d'une telle comparaison est principalement limitée par la détermination expérimentale de la carte du champ d'induction magnétique et de la géométrie du conducteur électrique, c'est à dire du produit Bl . L'idée de Kibble a été de remédier à cette difficulté en effectuant une mesure complémentaire en phase dynamique.

Cette deuxième phase requiert seulement l'invariance de l'induction magnétique et de la géométrie du conducteur pendant le temps de la mesure. Elle consiste à déplacer à vitesse constante v , suivant une trajectoire verticale, le conducteur en boucle ouverte dans le champ magnétique B considéré. Une force électromotrice ε est induite dans le conducteur ; elle peut être mesurée. Dans le cas d'une géométrie parfaite, elle est telle que :

$$\varepsilon = -v \cdot l \cdot B \quad (3)$$

En combinant (2) et (3), on peut éliminer B et l et on obtient l'égalité virtuelle annoncée :

$$m \cdot g \cdot v = -\varepsilon \cdot I \quad (4)$$

Cette relation (4) reste vraie pour des géométries et cartes du champ présentant des écarts à la géométrie parfaite étudiée ici, dès que ceux-ci sont invariants dans le temps et selon l'axe vertical.

Pour accéder à I , on place en série avec le conducteur une résistance étalon R et on mesure la différence de potentiel U aux bornes de R . On peut mesurer avec une grande exactitude les tensions ε et U et la résistance électrique R par comparaison à des étalons électriques reposant sur des effets quantiques macroscopiques (effet Josephson et effet Hall quantique, respectivement). Ces étalons permettent de rattacher les valeurs de ces tensions et résistances aux constantes de Josephson K_J et de von Klitzing R_K . En utilisant les modèles théoriques associés à ces effets quantiques, ces constantes sont elles-mêmes reliées à la constante de Planck h et à la charge de l'électron e selon :

$$K_J = \frac{2e}{h} \text{ et } R_K = \frac{h}{e^2} \quad (5)$$

En exprimant les tensions et la résistance par leurs valeurs obtenues à partir de ces constantes, la relation (4) devient :

$$m \cdot g \cdot v = A \cdot h, \quad (6)$$

où A est une quantité qui dépend de grandeurs mesurables avec une très haute exactitude (en particulier de la fréquence d'irradiation des jonctions Josephson et des nombres entiers liés à la quantification des valeurs de référence). On remarque que seule la constante de Planck h apparaît désormais : l'expérience est donc, au travers de la relation (6), une mesure de la constante de Planck.

La masse m , de l'ordre de 1 kg, peut être raccordée à mieux que 10^{-8} en valeur relative au prototype international du kilogramme. Pour conserver une telle exactitude, il est nécessaire de mesurer les autres grandeurs cinématiques (accélération de la pesanteur, vitesse du circuit. . .) intervenant dans (6) avec une incertitude relative au plus du même ordre de grandeur, ce qui peut être envisagé.

L'une des difficultés de cette expérience tient au fait que chaque grandeur physique intervenant dans l'expérience doit être mesurée avec la meilleure incertitude qu'il est actuellement possible d'atteindre et que les mesures de toutes ces grandeurs doivent être effectuées quasiment de manière simultanée. En outre, les effets des grandeurs d'influence (vibrations, température, défauts d'alignement. . .) doivent être réduits autant que possible pour ne pas affecter l'exactitude de la mesure de h .

En pratique, pour atteindre le degré d'exactitude recherché, les expériences de balance du watt doivent fonctionner sous vide. Cette configuration environnementale permet en effet d'éliminer :

- la poussée d'Archimède dont la correction introduit une composante d'incertitude non négligeable ;
- les déplacements de gaz et les échanges thermiques par convection, néfastes pour la stabilité de l'équilibre de la balance et du champ magnétique (issu en pratique d'un aimant permanent ou d'un circuit magnétique supraconducteur) ;
- la correction due à l'indice du milieu pour les mesures nécessairement interférométriques de position et de vitesse, qui introduit une composante d'incertitude non négligeable ;
- la contamination superficielle de la masse, source d'instabilité, pour peu qu'on maîtrise son raccordement à une référence conservée dans l'air.

Le développement d'une expérience de balance du watt fait donc appel à un large champ de compétences et à une technicité éprouvée dans de nombreux domaines de la métrologie. Il exige des investissements lourds de la part des pays qui s'y sont engagés.

4.2.3. Les principales expériences de balance du watt

Le principe de la balance du watt ayant été proposé par Kibble, c'est naturellement au *National Physical Laboratory* (NPL) au Royaume Uni, que la réalisation de la première expérience a été entreprise en 1977 [33–36]. L'expérience a été transférée en 2009 au *National Research Council* (NRC) au Canada.

Aux États-Unis d'Amérique, le *National Institute of Standards and Technology* (NIST, à l'époque NBS) a commencé dès 1980 la réalisation d'une expérience de balance du watt, aujourd'hui la plus imposante en taille (environ 5 m de haut) [37–40] et la plus productive en résultats.

L'office fédéral de métrologie suisse (METAS) a développé à partir de 1997 une nouvelle génération de

balance du watt en cherchant à réduire la taille de l'expérience pour mieux maîtriser les grandeurs d'influence [28, 41, 42]. La balance du watt suisse tient dans un volume de l'ordre d'un mètre cube et la masse de transfert utilisée n'est que de 100 g.

En 2004, le Bureau international des poids et mesures (BIPM) s'est engagé dans un tel projet [43–45]. L'une des particularités de cette expérience tient au fait que les phases statique et dynamique seront réalisées simultanément : en effet, grâce à l'utilisation d'un circuit électrique supraconducteur, les effets électromécaniques intervenant dans les deux étapes de l'expérience sont, dans le cas idéal, découplés.

Le Bureau national de métrologie (BNM), puis le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), pilotes successifs de la métrologie française, ont lancé et soutenu depuis 2002 la réalisation d'une expérience de balance du watt. Bénéficiant de l'expérience de ses prédécesseurs (NPL, NIST et METAS), l'expérience propose des solutions scientifiques et technologiques innovantes [46–55]. Les principaux éléments sont réalisés et testés ; l'assemblage est en cours ; l'expérience devrait être opérationnelle et permettre d'obtenir une première valeur de h à l'horizon 2011–2012, avec une incertitude qui pourra être améliorée au fil des années.

D'autres laboratoires nationaux ont maintenant le projet de développer ce type d'expérience, chacun apportant des variantes dans sa conception. On peut ainsi citer par exemple les projets néozélandais [56] et chinois [57].

4.3. Les premiers résultats

Pour l'instant, seules les expériences anglaises et américaines ont permis de réaliser le lien entre l'unité de masse et la constante de Planck avec une exactitude proche de celle qui est recherchée. La figure 6 présente les valeurs expérimentales de la constante de Planck obtenues et publiées depuis 1979 par différentes méthodes. On remarque que la dernière valeur ajustée Codata (*Committee on Data for Science and Technology*) de 2006 est presque identique à la valeur obtenue en 2005 par le NIST avec l'expérience de balance du watt. Cela s'explique par la méthode pondérée d'ajustement de valeur adoptée par Codata. La valeur la plus récente de la constante de Planck, obtenue par le NPL en 2007 [35] avec cette expérience, est :

$$h = 6,626\,070\,95(44) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$

avec une incertitude relative de $6,6 \times 10^{-8}$.

La valeur obtenue dès 1998 par le NIST a été confirmée en 2005 [38] avec une incertitude affinée, soit :

$$h = 6,626\,069\,01(34) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

L'incertitude relative publiée en 2005 est $5,2 \times 10^{-8}$ [38] ; elle a été révisée en 2007 et réduite à $3,6 \times 10^{-8}$ [39].

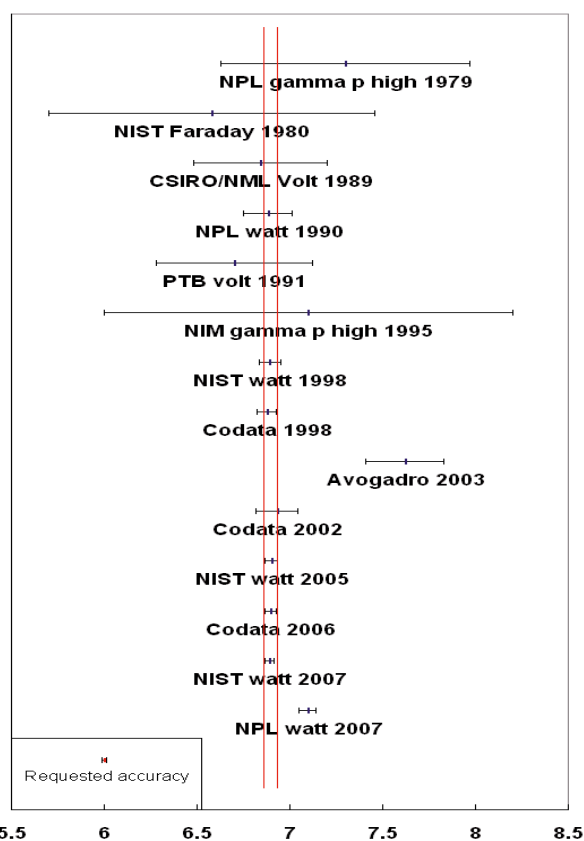


Fig. 6. – Valeurs expérimentales de la constante de Planck. Les deux lignes verticales correspondent à sa dernière valeur ajustée Codata 2006. Dans le cadre inférieur gauche, est représentée l'exactitude relative 2×10^{-8} énoncée comme nécessaire pour envisager un changement de la définition du kilogramme (Extrait de [58]).

L'écart relatif entre les valeurs obtenues par le NPL et le NIST est supérieur (10^{-6}) aux incertitudes de mesure. La cause de cet écart n'a toujours pas pu être mise en évidence à ce jour.

La valeur de la constante d'Avogadro publiée en 2003 [59] à partir d'un monocristal de silicium naturel est :

$$N_A = 6,022\,135\,3(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1},$$

avec une incertitude relative de $3,2 \times 10^{-7}$.

Elle permet de déduire une valeur de h par la relation :

$$h = \frac{cA_r(e)M_u\alpha^2}{2R_\infty N_A} \quad (7)$$

où la contribution à l'incertitude de la masse atomique relative de l'électron $A_r(e)$, de la constante de Rydberg R_∞ et de la constante de structure fine α sont meilleures que 10^{-8} ; la vitesse de la lumière c et la constante de masse molaire M_u étant connues exactement, c'est l'incertitude de N_A qui apporte la contribution dominante. La valeur de h déduite de cette mesure de la constante

d'Avogadro présente un écart relatif significatif avec la valeur du NIST de l'ordre de 10^{-6} [60].

Le résultat le plus récent obtenu à partir de deux sphères en monocristal de silicium enrichi en isotope ^{28}Si [61] donne une valeur moyenne de N_A :

$$N_A = 6,022\,140\,84(18) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

Avec cette nouvelle détermination, l'incertitude relative est de $3,0 \times 10^{-8}$, elle a donc été améliorée d'un ordre de grandeur. Par rapport à la dernière valeur de h obtenue au moyen de la balance du watt du NIST, cette valeur de N_A conduit à un écart relatif sur h de $1,5 \times 10^{-7}$.

5. Vers un système d'unités basé sur des constantes fondamentales de la nature

5.1. Une nouvelle définition pour l'unité de masse

Le principe d'un changement de définition de l'unité de masse est acquis au sein de la communauté des physiciens et métrologues : en reliant l'unité à une constante de la nature, il permettra de corriger les inconvénients de la définition actuelle du kilogramme. Mais une large fraction de la communauté scientifique est convaincue que le Système international d'unités doit désormais évoluer vers un SI basé sur des constantes physiques fondamentales ou atomiques [62–66]. On peut même envisager un nouveau système ne faisant plus la distinction entre les unités de base et les unités dérivées [66].

En ce qui concerne la masse, les avis sont contrastés : certains estiment qu'il faut procéder très rapidement [66] et que dès 2007, la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) aurait pu sanctionner une nouvelle définition. Plus certainement, la CGPM programmée en 2011 pourrait se prononcer sur le principe, et reporter la mise en œuvre effective après une large diffusion préalable d'informations aux communautés concernées, après l'établissement des recommandations indispensables pour la mise en pratique des définitions et après le succès des expériences engagées, à partir desquelles le Codata pourra établir des valeurs recommandées pour les constantes concernées.

D'après la relation (7), figer la valeur numérique de la constante de Planck ou de la constante d'Avogadro a obligatoirement une conséquence sur la valeur de l'autre constante et sur l'incertitude associée. Le changement de définition de l'unité de masse aura également des conséquences sur la mise en œuvre d'autres unités, liées par exemple à la quantité de matière ou aux grandeurs électriques. Il a donc en effet vocation à provoquer une refonte du Système international d'unités. En figeant la valeur numérique d'autres constantes telles que la charge de l'électron e (évidemment en lieu et place de la perméabilité magnétique du vide) ou la constante de Boltzmann k_B on pourrait élaborer un système d'unités très largement basé sur des constantes physiques fondamentales [25, 62].

L'intérêt de l'expérience de la balance du watt est, dans ce contexte, encore renforcé. Cette expérience, en conjonction avec la détermination de R_K , conduit à une détermination locale de K_J et donc – en supposant exactes les relations théoriques (5), à ce jour non démenties – de la charge de l'électron e . Une valeur de la masse de l'électron peut par ailleurs être déduite indirectement de la valeur de h , en particulier par la relation (7). Enfin, la comparaison des valeurs des rapports h/m issus de la balance du watt et d'expériences de physique atomique peut conduire à une détermination de la constante d'Avogadro indépendante de l'électrodynamique quantique. La comparaison de la valeur ainsi obtenue de N_A avec celle issue de l'expérience de la sphère de silicium constitue par ailleurs un triangle métrologique dont le but est d'apporter des informations sur l'exactitude des relations théoriques définissant les valeurs de K_J et R_K [67].

La balance du watt constitue donc un élément clef pouvant contribuer à une large évolution du SI vers un système essentiellement basé sur des constantes physiques fondamentales ou des propriétés atomiques [68]. Cette évolution permettrait de leur conférer un caractère universel et impérissable, conforme à la physique actuelle.

5.2. Mise en pratique de la nouvelle définition

Si tous les métrologues reconnaissent que la définition actuelle du kilogramme basée sur un étalon matériel n'est pas satisfaisante et doit être changée, la plupart d'entre eux estiment que la réflexion préalable doit être poursuivie, en particulier pour préciser les conditions de mise en pratique d'une nouvelle définition. Mais pour certains, il est inutile d'attendre [66]. En effet, fixer la valeur numérique de h ou de N_A réduit de manière automatique et significative l'incertitude de nombreuses autres constantes fondamentales qui ouvre de nouvelles pistes bien au-delà du champ de la métrologie.

Bien entendu la mise en pratique d'une telle nouvelle définition requiert plusieurs développements expérimentaux non encore aboutis. Il apparaîtrait donc nécessaire de maintenir provisoirement le prototype international du kilogramme en lui affectant une valeur conventionnelle exacte (*a priori* 1 kg). Une telle décision reviendrait, pour une période assez longue, à créer une échelle pratique d'unité pour la masse, comme il en existe aujourd'hui pour les mesures de température et, pour partie, en électricité. Coexisteraient alors deux systèmes d'unités :

- un système (le SI) basé sur des constantes physiques fondamentales ou atomiques pour les physiciens ;
- un système pratique pour la masse et ses grandeurs dérivées, référencé au prototype international du kilogramme, utilisé dans l'industrie ou le commerce et, de fait, dans une grande partie de la recherche scientifique et technique.

Ce « kilogramme conventionnel » ne résoudrait donc aucune des difficultés rencontrées aujourd'hui. . .

Il faut cependant reconnaître qu'une « mise en pratique de l'unité » (c'est-à-dire la constitution d'un premier étalon matériel caractérisé) basée sur la balance du watt, sur une sphère en monocristal de silicium enrichi ou sur toute autre expérience permettant de raccorder une masse macroscopique à une constante physique fondamentale ou atomique n'est pas simple. Une étude de la stabilité du prototype international, effectuée par comparaison à une réalisation de l'unité de ce type, s'avère indispensable. Elle a vocation à durer plusieurs années, afin de ne pas rompre l'excellent accord existant actuellement entre les étalons de masse au niveau international. Il sera certainement nécessaire d'associer au prototype international d'autres « kilogrammes » pour former des lots d'étalons témoins (tant au niveau international que national) permettant de garantir, en pratique, la transition entre l'ancienne et la nouvelle définition.

Aussi, plusieurs préalables au changement de la définition semblent s'imposer :

- l'existence d'un consensus international obtenu à partir d'un nombre suffisant de résultats redondants fournis par différentes expériences indépendantes avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} ;
- une méthode et des critères d'ajustement consensuels pour figer la valeur numérique de la constante physique fondamentale choisie afin d'éviter toute remise en cause à court terme ;
- une exactitude pour la détermination de la valeur numérique de la constante choisie permettant d'éviter toute conséquence pratique pour les nombreux utilisateurs et, en particulier de maintenir les valeurs d'ajustage des poids, que ce soit au moment du changement de définition ou postérieurement suite à des ajustements ou corrections.

Pour la mise en pratique de la future définition de l'unité de masse, quelle qu'elle soit, la relation (7), reliant la constante d'Avogadro et la constante de Planck, permet d'utiliser aussi bien une sphère monocristalline de silicium enrichi qu'une expérience de balance du watt. Or les avantages et inconvénients associés à ces méthodes sont différents.

Par exemple, utiliser un artefact en silicium enrichi est un moyen simple à mettre en œuvre dès que l'on dispose d'un comparateur de masse adapté. Mais, comme tout artefact, chaque sphère a ses propres caractéristiques et comportement : il sera indispensable de maîtriser sa conservation et de contrôler sa stabilité dans le temps.

L'expérience de balance du watt présente l'avantage de permettre, sur les montages employés, une amélioration permanente. En revanche c'est une expérience lourde, exigeant une maintenance rigoureuse et des moyens humains et matériels importants.

Disposer de deux méthodes, basées sur des principes physiques différents, pour concourir au même but, constitue donc un réel atout : l'artefact en silicium pourra

être validé périodiquement par la démarche expérimentale mettant en œuvre la balance du watt.

6. Les futurs étalons de transfert

6.1. La future chaîne d'étalonnage

Les conséquences d'une nouvelle définition sur les étalons nationaux de transfert et leurs conditions de raccordement sont inévitables. Mais ces modifications ne devront pas avoir d'impact sur les méthodes et les moyens déployés par les laboratoires accrédités et les utilisateurs, ni bouleverser les réglementations ou les normes en vigueur et les recommandations de la métrologie légale.

Certains [65] avancent que la contribution de la composante supplémentaire d'incertitude introduite par la nouvelle mise en pratique deviendra rapidement négligeable au fur et à mesure des étapes de dissémination et n'aura pas de conséquence pour les « poids » faisant l'objet d'un classement. D'autres [69] au contraire insistent sur le fait que les incertitudes relatives aux nouvelles réalisations de l'unité de masse doivent être strictement limitées et correctement maîtrisées. Les valeurs des incertitudes de la mise en pratique doivent satisfaire à des conditions exigeantes afin que la propagation de ces incertitudes vers les poids de classe E_1 n'ait pas de conséquence sur l'ajustage de ces derniers.

A priori, seuls les laboratoires nationaux de métrologie auront à adapter leurs méthodes et leurs moyens pour raccorder des références nationales permettant d'assurer la dissémination dans les mêmes conditions de performance qu'actuellement.

Les étalons de transfert des laboratoires nationaux devront en effet satisfaire un certain nombre de critères. En ce qui concerne le matériau constituant ces étalons (qui doit bien sûr satisfaire les exigences énoncées dans la Sect. 3.2), deux critères supplémentaires sont à considérer :

- présenter une susceptibilité magnétique aussi faible que possible. Ce critère est particulièrement déterminant dans l'expérience de balance du watt où il est nécessaire de créer une induction magnétique intense (comprise entre 0,1 T et 1 T) qui, malgré le confinement dans l'aimant, peut engendrer des gradients de champ magnétique non négligeables autour de la masse de transfert.
- présenter un comportement stable et maîtrisable dans le vide. La valeur de l'étalon de transfert devra être déterminée sous vide avec une incertitude relative du même ordre de grandeur que dans l'air. Il faudra, en particulier, maîtriser la variation de masse due aux phénomènes de sorption lors du passage de l'air au vide.

Ces deux points ont suscité de nombreuses études, encore en cours pour la plupart, sur les propriétés des matériaux et leur comportement de surface lors de leur transfert entre l'air et le vide.

6.2. Le choix des matériaux

Pour les expériences impliquant un monocristal, le silicium naturel avait été sélectionné à cause de son importante utilisation dans l'industrie électronique : les propriétés du matériau étaient très bien connues et les technologies de fabrication éprouvées [70]. La réalisation de sphère en silicium de 1 kg a été mise au point par le laboratoire australien NMI utilisant une technique de polissage abrasif pour la finition [71]. Pour améliorer l'exactitude de la détermination de la masse molaire compte tenu de la présence des trois isotopes naturels, on a été tenté de substituer le germanium au silicium, mais l'avancement moindre des technologies de fabrication s'est avérée rédhibitoire à ce stade. On a donc cherché à enrichir le silicium de son isotope le plus abondant, par méthodes de centrifugation de SiF_4 gazeux développées dans des laboratoires russes. La croissance d'un cristal de 4,8 kg de silicium enrichi à 99,985 % en isotope 28 a finalement été effectuée en 2007 par le laboratoire berlinois IKZ.

Pour le projet de balance du watt, on s'est orienté vers la recherche d'alliages métalliques de très faible susceptibilité magnétique pour la réalisation d'une masse de transfert de forme cylindrique. Premier choix, l'or pur est un métal noble de susceptibilité magnétique égale à $-3,4 \times 10^{-5}$ compatible avec l'expérience de balance du watt, bien meilleure que celle du platine iridié ($+25 \times 10^{-5}$). Des artefacts en or pur ont été réalisés, ainsi que quelques pièces en cuivre de haute pureté (présentant aussi une très faible susceptibilité magnétique) recouvert d'un plaquage d'or (afin de réduire l'oxydation superficielle de ce matériau dans l'air) [72]. Mais les exigences en matière de dureté, rappelées dans la section 3.2, se sont avérées rédhibitoires. Des études plus poussées ont été engagées à partir de 2003 sous l'impulsion de la métrologie française, dans le cadre d'un projet européen Euramet [52], coordonné par le LNE-INM avec une forte implication du LNE. Après quelques essais sur des alliages dentaires à base d'or [73], quelques matériaux parmi lesquels un alliage quaternaire à 75 % d'or, un alliage amorphe à base de platine et l'iridium pur ont été sélectionnés à partir de 2007. Bien que le projet européen ait pris fin début 2008, le laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM poursuit ses investigations sur ces trois matériaux.

On peut remarquer que la susceptibilité magnétique du silicium rend ce matériau compatible avec les exigences de la balance du watt.

6.3. Le passage air-vide

La réalisation de comparaisons de masse sous vide présente l'avantage d'éliminer les effets de convection et surtout l'effet de la poussée de l'air, dont la compensation impose d'appliquer au résultat une correction différentielle qui introduit une composante d'incertitude importante sur l'incertitude composée d'étalonnage des étalons de référence et de transfert des laboratoires nationaux. De plus, dans la perspective d'un changement de

définition accompagné d'une mise en pratique nécessitant de placer la balance du watt ou le monocristal de silicium sous vide, il devient indispensable d'étudier le comportement des étalons de transfert lors du passage air-vide. Il existe désormais sur le marché des comparateurs de kilogrammes de haute performance équipés d'une enceinte à vide.

Mais le passage de l'air au vide introduit une variation de la masse physique de l'artefact considéré, due à la modification des couches superficielles adsorbées. L'une des principales molécules impliquées dans ces phénomènes plus ou moins réversibles de sorption est la molécule d'eau présente dans l'air ambiant et, en pratique, sur toutes les surfaces en contact avec l'air ambiant. Pour évaluer cet effet, de nombreux travaux ont été menés, utilisant des techniques d'analyse des couches de surface (ellipsométrie, spectrométrie de masse...) et des techniques gravimétriques, appliquées aussi bien sur les matériaux courants de la métrologie des masses (platine iridié et acier inoxydable) que sur les matériaux intéressants les expériences pour le raccordement à une constante physique fondamentale (silicium, iridium, alliage d'or...). Les conclusions sont publiées [74–76]. L'interprétation des résultats de ces études est d'autant plus complexe que le comportement du matériau considéré lors du passage air-vide dépend aussi de la méthode de nettoyage initiale appliquée (par exemple thermodesorption sous vide), des conditions de conservation (par exemple maintien sous gaz neutre) et du protocole de transfert air-vide lui-même.

Le développement des comparaisons sous vide ne supprime aucunement la nécessité de mesurer la masse d'étalons de référence dans l'air ou sous gaz neutre avec la meilleure exactitude possible. Il est donc indispensable de réduire encore la contribution à l'incertitude de la correction différentielle de poussée de l'air. Une méthode gravimétrique pour déterminer la masse volumique de l'air a été développée [9, 77, 78] en utilisant des artefacts pesés sous vide et dans l'air. Elle permet de réduire significativement la composante d'incertitude concernée et diminue de plus de 30 % de l'incertitude d'étalonnage dans l'air d'un étalon.

7. Conclusion

Le kilogramme est la seule des sept unités de base du Système international d'unités (SI) qui soit encore aujourd'hui définie par un étalon matériel : le prototype international du kilogramme. Pour des raisons de disponibilité, de pérennité et d'universalité, il est indispensable de changer la définition de l'unité de masse en établissant une relation avec une constante physique fondamentale ou atomique

Pour redéfinir l'unité de masse, il convient d'abord de mesurer avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-8} une constante physique fondamentale ou atomique dont la dimension fait intervenir la masse, par rapport à une masse macroscopique raccordée au prototype international du kilogramme. On peut alors attribuer par convention

une valeur fixée à la valeur numérique de la constante considérée et définir (implicitement) l'unité de masse à partir de celle-ci.

L'évolution de l'unité de masse serait alors similaire à celle dont a fait l'objet la définition du mètre en 1983 : en s'appuyant sur l'hypothèse de pérennité et d'uniformité de la vitesse de propagation c de la lumière dans le vide, la CGPM a fixé la valeur numérique de c , entraînant la définition du mètre à partir de celle de la seconde.

Les deux expériences les plus avancées sont la mesure de la constante d'Avogadro à l'aide d'un monocristal de silicium et la mesure de la constante de Planck par l'expérience de la balance du watt. L'expérience du monocristal de silicium repose sur la réalisation d'un artefact ; nécessaire pour contribuer à établir et matérialiser efficacement une nouvelle définition de l'unité de masse, elle semble à elle seule ne pas pouvoir servir de base unique à cette nouvelle définition. On s'oriente donc vers une définition de la masse à partir de la constante de Planck. Le NIST, dans une expérience de balance du watt, a publié la valeur de la constante de Planck de plus faible incertitude actuellement : incertitude relative $3,6 \times 10^{-8}$. Mais un désaccord significatif persiste avec la valeur déterminée par le NPL et avec la valeur déduite de celle de la constante d'Avogadro obtenue à partir d'une sphère en monocristal de silicium naturel. Des études sont en cours pour comprendre et résoudre ces écarts. Les résultats de l'expérience française de balance du watt ou ceux obtenus à partir d'un monocristal de silicium enrichi sont donc très attendus.

La mise en place d'une nouvelle définition pour la masse requiert un consensus international qui ne peut être établi qu'à partir d'un nombre suffisant de valeurs cohérentes obtenues de façon indépendante. Elle exige une décision de la CGPM dont les deux prochaines réunions doivent avoir lieu en 2011 et 2015.

La poursuite de plusieurs expériences de balance du watt est donc nécessaire. Ces montages permettront, une fois la définition promulguée, la mise en pratique du kilogramme ; elles contribueront aussi à tester l'exactitude des modèles relatifs aux effets quantiques intervenant en métrologie électrique.

À ce stade, il est probable que la modification de l'unité de masse interviendrait dans le cadre d'une refonte globale du système international d'unités, qui pourrait être construit autour de constantes physiques fondamentales telles que la vitesse de la lumière dans le vide, la constante de Planck, la charge de l'électron, la constante de Boltzmann, la constante d'Avogadro, d'une constante atomique liée à l'écart hyperfin du césium dans l'état fondamental, et d'une constante « naturelle » liée à la photométrie. Le principal risque d'une telle refonte est de créer deux systèmes internationaux d'unités : un système pour les physiciens basé sur des constantes fondamentales et un système pratique pour quelques grands domaines, comme la masse et ses grandeurs dérivées, privilégié par l'industrie et le commerce dont la référence serait toujours matérialisée par des artefacts. Un travail préalable de concertation

et de clarification des méthodes de « mise en pratique » des définitions doit permettre d'éviter un tel écueil.

En effet, les travaux qui visent à redéfinir l'unité de masse à partir d'une constante physique fondamentale ou atomique ne doivent pas conduire à négliger cette mise en pratique : les comparateurs et les étalons matériels demeureront nécessaires à la chaîne métrologique, même si des instruments reposant sur des principes physiques différents pourront, à terme, voir le jour. Les grands laboratoires nationaux de métrologie ont entrepris des études sur les matériaux qui pourraient être utilisés pour réaliser les étalons de transfert des expériences de balance du watt ou du monocristal de silicium. Ils étudient également les propriétés de nouveaux matériaux et leur comportement lors du passage air-vide. La métrologie française, en particulier, a engagé d'importantes études sur les nouveaux matériaux destinés à la fabrication d'étalons de transfert utilisables à partir de la balance du watt dont elle assure le développement ; cette dernière devrait être opérationnelle dans quelques années.

Avec la balance du watt, après avoir participé aux études préalables au changement de définition, la France restera un acteur majeur dans la maintenance et la dissémination de l'unité de masse par la constitution d'un lot d'étalons témoins, dès que la définition aura changé. Elle disposera d'un outil pour améliorer la connaissance des constantes fondamentales et des modèles associés aux phénomènes quantiques macroscopiques mis à profit aujourd'hui en métrologie électrique. Elle pourra, si besoin, compléter ses moyens par la construction ou l'acquisition d'une sphère de silicium caractérisée.

Enfin, les compétences acquises et la conception novatrice de nombreux éléments de cette expérience ont vocation à être valorisées par des transferts de technologie ou de compétence dans des domaines technologiques variés : mesures de déplacement, aimants, commande mécanique... L'ouverture du projet à la coopération avec des partenaires français ou étrangers, industriels et académiques assure également le rayonnement de la métrologie française et permet de faire connaître et reconnaître les compétences de ses laboratoires nationaux.

Références

- [1] HIMBERT M., "A brief history of measurement", *Eur. Phys. J., special topics*, **172**, 2009, 25-35.
- [2] MARQUET L., « Histoire de la naissance du kilogramme », *Bulletin du BNM*, **76-77**, 1989, 9-18.
- [3] Comptes rendus de la 1^{re} CGPM (1889), 1890, 34.
- [4] PLASSA M., « Le prototype international du kilogramme – Un étalon réussi – Histoire de son choix et de sa réalisation », *Bulletin du BNM*, **104**, 1996, 23-29.
- [5] GIRARD G., "International Report: The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988-1992)", *Metrologia*, **31**, 4, 1994, 317-336.
- [6] QUINN T.J., "The kilogram : The Present State of Our Knowledge", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **40**, 2, 1991, 81-85.

- [7] GIACOMO P., "Equation for the determination of the density of moist air (1981)", *Metrologia*, **18**, 1982, 33-40.
- [8] DAVIS R S., "Equation for the determination of the density of moist air (1981/91)", *Metrologia*, **29**, 1992 67-70.
- [9] PICARD A. et FANG H., "Three methods of determining the density of moist air during mass comparisons", *Metrologia*, **39**, 2002, 31-40.
- [10] PICARD A., DAVIS R. S., GLÄSER M. et FUJII K., "Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)", *Metrologia*, **45**, 2008, 149-155.
- [11] PINOT P., AUPETIT C., HIMBERT M., KHÉLIFA N., LECOLLINET M., LEPOUTRE F. et ZERROUKI C., « L'étalonnage de kilogrammes au BNM-INM », *Bulletin du BNM*, **117**, 3, 1999, 11-23.
- [12] OIML R 111 – 1, "Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, Part 1: Metrological and technical requirements", Edition 2004 (E).
- [13] OIML D28, "Conventional value of the result of weighing in air", Edition 2004 (E).
- [14] PINOT P., "Stability of XSH Alacrite mass standards: study of the effect of the BIPM cleaning/washing method", *Metrologia*, **34**, 1997, 133-141.
- [15] MEURY P.-A., « Alliages métalliques pour l'étalon de masse de la balance du watt et des étalons secondaires », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris – Sciences et génie des matériaux, 7 décembre 2005.
- [16] MEURY P.-A., HUNTZ A. M., MOLINS R., HERBST-GHYSEL M. et SÉVÉRAC C., "Effect of the ambient atmosphere on the surface reactivity of materials for the realization of reference mass standards", *Metrologia*, **44**, 2007, 253-265.
- [17] AUPETIT C., CHAMONT Y. et PINOT P., « Le polissage des étalons de masse au BNM-INM », *Actes des conférences, Congrès International de Métrologie*, Toulon, France, 2003, présentation 116, disponible sur CDrom.
- [18] HAIDAR Y., TOLLENS E., SILVESTRI Z., DE FORNEL F., ZERROUKI C., PICARD A. et PINOT P., "Study and comparison of two polishing methods for platinum-iridium surfaces by means of three characterization techniques", *Metrologia*, **42**, 2005, 115-128.
- [19] TAILLADE F., SILVA M. Z., LEPOUTRE F., LECOLLINET M. et PINOT P., "The mirage effect to investigate the adsorption of organic molecules on the surface of mass standards", *Metrologia*, **38**, 2001, 107-114.
- [20] PINOT P., « Nettoyage des étalons de masse en Alacrite XSH : étude de mouillabilité des solvants », *Bulletin du BNM*, **115**, 1996, 11-22.
- [21] ZERROUKI C., MISEREY F. et PINOT P., "The nanometric roughness of mass standards and the effect of BIPM cleaning-washing techniques", *Metrologia*, **36**, 1999, 403-414.
- [22] DAVIDSON S., "A review of surface contamination and the stability of standard masses", *Metrologia*, **40**, 2003, 324-338.
- [23] GIRARD G., « Le nettoyage-lavage des prototypes du kilogramme au BIPM », *document non publié du BIPM*, Sèvres, 1990.
- [24] TAYLOR B.N., "The Possible Role of the Fundamental Constants in Replacing the Kilogram", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **40**, 1991, 86-91.
- [25] BORDÉ C. J., « Métrologie fondamentale : unités de base et constantes fondamentales », *C. R. Physique*, **5**, 2004, 813-820.
- [26] *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 2, (publié par W. D. Niven), Cambridge University Press, 1890, 215-229.
- [27] Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées, BIPM, Rapport de la 5^e session, 1993.
- [28] EICHENBERGER A., JECKELMANN B. et RICHARD P., "Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods", *Metrologia*, **40**, 2003, 356-365.
- [29] GLÄSER M., "Tracing the atomic mass unit to the kilogram by ion accumulation", *Metrologia*, **40**, 2003, 376-386.
- [30] BECKER P., "Tracing the definition of the kilogram to the Avogadro constant using a silicon single crystal", *Metrologia*, **40**, 2003, 366-375.
- [31] BECKER P., "History and progress in the accurate determination of the Avogadro constant", *Rep. Prog. Phys.*, **64**, 2001, 1945-2008.
- [32] KIBBLE B.P., *Atomic Masses and Fundamental constants* **5**, ed. J.H. Sanders and A.H. Wapstra, New-York Plenum, 1976, 545-551.
- [33] KIBBLE B.P., ROBINSON I.A. et BELLIS J.H., "A realization of the SI watt by the NPL moving coil balance", *Metrologia*, **27**, 1990, 173-192.
- [34] ROBINSON I.A. et KIBBLE B.P., "The NPL moving coil apparatus for measuring Planck's constant and monitoring the kilogram", *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, **46**, 2, avril 1997.
- [35] ROBINSON I.A. et KIBBLE B.P., "An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance", *Metrologia*, **44**, 6, 2007, 427-440.
- [36] ROBINSON I.A., "Towards a final result from the NPL markII watt balance", *IEEE Trans. On Instrum. And Meas.*, **58**, 4, 2009, 936-941.
- [37] STEINER R.L., NEWELL D. et WILLIAMS E., "Details of the 1998 watt balance experiment. Determining the Planck constant", *J. Reas. Natl. Stand. Technol.*, **110**, 2005, 1-26.
- [38] STEINER R.L., WILLIAMS E.R., NEWELL D.B. et LIU R., "Towards an electronic kilogram: an improved measurement of the Planck constant and electron mass", *Metrologia*, **42**, 5, 2005, 431-441.
- [39] STEINER R.L. *et al.*, "Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram", *IEEE Trans. On Instrum. And Meas.*, **56**, 2007, 592-596.
- [40] STEINER R.L. *et al.*, "Estimating uncertainty limits in the NIST-2008 electronic kilogram", *Proceedings CPEM*, Broomfield, USA, 8-13 juin 2008, 10-11.
- [41] BEER W., JEANNERET B., JECKELMANN B., RICHARD P., COURTEVILLE A., SALVADÉ Y. et DÄNDLIKER R., "A proposal for a new moving-coil experiment", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **48**, 2, 1999, 192-195.
- [42] EICHENBERGER A. *et al.*, "Reproducibility of the METAS watt balance", *Proceedings CPEM 2008*, Broomfield, USA, 8-13 juin 2008, 12-13.

- [43] PICARD A., STOCK M. et FANG H., "The BIPM Watt Balance", *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, CPEM Digest, 128, 2006.
- [44] PICARD A. *et al.*, "The BIPM watt balance", *IEEE trans. On instrum. Meas.*, **56**, 2, 2007.
- [45] PICARD A., FANG H., KISS A., de MIRANDÉS E., STOCK M., et URANO C., "Progress on the BIPM watt balance", *IEEE Trans. On Instrum. And Meas.*, **58**, 4, 2009, 924-929.
- [46] GENEVÈS G., GOURNAY P., GOSSET A., LECOLLINET M., VILLAR F., PINOT P., JUNCAR P., CLAIRON A., LANDRAGIN A., HOLLEVILLE D., Pereira Dos SANTOS F., DAVID J., BESBES M., ALVES F., CHASSAGNE L. et TOPÇU S., "The BNM watt balance project", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **54**, 2 - *Special issue on CPEM 2004*, 2005, 850-853.
- [47] GENEVÈS G., GOURNAY P., VILLAR F., PINOT P., JUNCAR P., LECOLLINET M., CHASSAGNE L., CLAIRON A., LANDRAGIN A., HOLLEVILLE D., PEREIRA Dos Santos F., DAVID J., BESBES M., ALVES F., TOPÇU S., HADDAD D., GOSSET A., SILVESTRI Z., MEURY P.-A., MADEC T. et MACÉ S., « La balance du watt : vers une nouvelle définition de l'unité de masse ? », *Revue Française de Métrologie*, **9**, 1, 2007, 3-34.
- [48] VILLAR F., DAVID J., GENEVÈS G., JUNCAR P. et PINOT P., "Long stroke flexure stage for a watt balance experiment", *EUSPEN 6th international conference*, Baden, Autriche, mai-juin 2006.
- [49] PINOT P., GENEVÈS G., HADDAD D., DAVID J., JUNCAR P., LECOLLINET M., MACÉ S. et VILLAR F., "Theoretical analysis for the design of the French watt balance experiment force comparator", *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 095108, 2007, 11p.
- [50] PINOT P., MACÉ S., GENEVÈS G., GOURNAY P., HADDAD D., LECOLLINET M., VILLAR F. et HIMBERT M.E., "Dynamic behaviour of a monolithic suspension device for the French watt balance experiment", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2008, version électronique disponible sur www.epjap.org, DOI: 10.1051/epjap:2008107.
- [51] HADDAD D., WAKIM M., CHASSAGNE L., TOPÇU S., JUNCAR P. et ALAYLI Y., « Contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique dans le projet balance du watt », *Revue Française de Métrologie*, **6**, 2, 2006.
- [52] PINOT P. *et al.*, "Study of materials for the realization of mass standards", Final Report, Euramet Mass 734, Com.08-01, 2008, 79 (document disponible au LNE-CNAM).
- [53] GOURNAY P., GENEVÈS G., ALVES F., BESBES M., VILLAR F. et DAVID J., "Magnetic circuit design for the BNM watt balance experiment", *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, **54**, 2, 2005, 742-745.
- [54] HADDAD D., JUNCAR P., PINOT P. et GENEVÈS G., "Absolute position sensor with nanometric resolution", in *Proceedings of the 7th Euspen International Conference - Bremen*, 2007, 294-297.
- [55] CHEINET P., PEREIRA DOS SANTOS F., CLAIRON A., DIMARCQ N., HOLLEVILLE D. et LANDRAGIN A., « Gravimètre à atomes froids », *J. Phys. IV France*, **119**, 2004, 153-154.
- [56] SUTTON C.M., "On a watt balance design for a non-artefact kilogram", *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on mass force and torque (APMF 2007)*, 24-25 oct. 2007.
- [57] ZHANG Z., HE Q. et LI Z., "An approach for improving the watt balance", *Proceedings CPEM 2006*, Torino, Italy, 9-14 juillet 2006, 126-127.
- [58] EICHENBERGER A., GENEVÈS G. et GOURNAY P., "Determination of the Planck constant by means of a watt balance", International School "quantum metrology and fundamental constants", Les Houches, France, Octobre 2007.
- [59] BECKER P., BETTIN H., DANZENBRINK H.-U., GLÄSER M., KUETGENS U., NICOLAUS A., SCHIEL D., de BIÈVRE P., VALKIERS S. et TAYLOR P., "Determination of the Avogadro constant via the silicon route", *Metrologia*, **40**, 2003, 271-287.
- [60] DAVIS R.S., "Possible new definitions of the kilogram", *Phil. Trans. R. Soc. A*, **363**, 2005, 2249-2264.
- [61] ANDREAS B., AZUMA Y., BARTL G., BECKER P., BETTIN H., BORYS M., BUSCH I., GRAY M., FUCHS P., FUJII K., FUJIMOTO H., KESSLER E., KRUMREY M., KUETGENS U., KURAMOTO N., MANA G., MANSON P., MASSA E., MIZUSHIMA S., NICOLAUS A., PICARD A., PRAMANN A., RIENITZ O., SCHIEL D., VALKIERS S. et WASEDA A., "An accurate determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal", IAC/NAh 28Si NA 1.0, 2010, <http://arXiv:1010.2317v1>.
- [62] BORDÉ C.J., "Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics", *Phil. Trans. R. Soc. A*, **363**, 2005, 2177.
- [63] MILLS I.M., MOHR P.J., QUINN T.J., TAYLOR B.N. et WILLIAMS E.R., "Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation I (CI-2005)", *Metrologia*, **43**, 2006, 227-246.
- [64] BECKER P., De BIÈVRE P., FUJII K., GLAESER M., INGLIS B., LUEBBIG H. et MANA G., "Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units", *Metrologia*, **44**, 2007, 1-14.
- [65] CABIATI F. et BICH W., "Thoughts on a changing SI", *Metrologia*, **46**, 2009 457-466.
- [66] MILLS I. M., MOHR P. J., QUINN T. J., TAYLOR B. N. et WILLIAMS E.R., "Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come", *Metrologia*, **42**, 2005, 71-80.
- [67] BIRABEN F., CADORET M., CLADÉ P., GENEVÈS G., GOURNAY P., GUELLATI-KHÉLIFA S., JULIEN L., JUNCAR P., de MIRANDES E. et NEZ F., "Proposal for new experimental schemes to determine the Avogadro constant", *Metrologia*, **43**, 2006, L47-L50.
- [68] ROBINSON I.A., "Toward the Redefinition of the Kilogram: Measurements of Planck's Constant Using Watt Balances", *IEEE Trans. On Instrum. And Meas.*, **58**, 4, 2009, 942-948.
- [69] GLÄSER M., BORYS M., RATSCHKO D. et SCHWARTZ R., "Redefinition of the kilogram, CCM recommendations and uncertainty propagation", *Metrologia*, **47**, 2010, 419-428.

- [70] SEYFRIED P. et BECKER P., “The role of N_A in the SI: An Atomic Path to the kilogram”, *Metrologia*, **31**, 1994, 167-172.
- [71] LEISTNER A. et ZOSI G., “Polishing a 1-kg silicon sphere for a density standard”, *Applied Optics*, **26**, 4, 1987, 600-601
- [72] BEER W., FASEL W., MOLL E., RICHARD P., SCHNEITER U., THALMANN R. et EGGER J., “The METAS 1 kg vacuum mass comparator – adsorption layer measurements on gold-coated copper buoyancy artefacts”, *Metrologia*, **39**, 2002, 263-268.
- [73] SILVESTRI Z., DAVIS R.S., GENEVÈS G., GOSSET A., MADEC T., PINOT P. et RICHARD P., « Volume magnetic susceptibility of gold-platinum alloys : possible materials to make mass standards for the watt balance experiment », *Metrologia*, **40**, 2003, 172-176.
- [74] PICARD A. et FANG H., “Methods to determine water vapour sorption on mass standards”, *Metrologia*, **41**, 2004, 333-339.
- [75] MIZUSHIMA S., “Determination of the amount of gas adsorption on SiO₂/Si(100) surfaces to realize precise mass measurement”, *Metrologia*, **41**, 2004, 137-144.
- [76] DAVIDSON S., “Determination of the effect of transfer between vacuum and air on mass standards of platinum–iridium and stainless steel”, *Metrologia*, **47**, 2010 487-497.
- [77] PICARD A. et FANG H., “Mass comparisons using air buoyancy artefacts”, *Metrologia*, **41**, 2004, 330-332.
- [78] MADEC T. et MEURY P.-A., “Mesure de la masse volumique de l’air par méthode gravimétrique pour l’étalonnage des masses”, *Revue Française de Métrologie*, **16**, 2008, 15-19.

Article reçu le 9 juillet 2009, version révisée reçue le 3 décembre 2010.