



Pourquoi la masse diminue-t-elle sous vide ?

METAS s'est engagé depuis plusieurs années sur la voie de la détermination de masse sous vide. Les résultats obtenus par les expériences ayant pour but de redéfinir l'unité de masse à partir de constantes fondamentales rendent ce sujet particulièrement actuel. Notre nouveau projet d'analyse de surface par méthode couplée permettra la caractérisation complète des étalons de masse utilisés dans ce type d'expériences et de définir la masse obtenue lors de pesages dans l'air et sous vide.

PHILIPPE RICHARD

Toutes les unités de base du Système international d'unités (SI), à l'exception du kilogramme, sont réalisées à l'aide de constantes fondamentales [1]. Depuis 1889 le prototype international du kilogramme définit l'unité de masse [2]. Ce prototype, bien que protégé par trois cloches en verre emboîtées à l'image de poupées russes, est conservé dans l'air.

Le kilogramme dans l'air

La dissémination de l'unité de masse par la comparaison des prototypes nationaux du kilogramme avec le prototype international a lieu dans l'air. Il en va de même de la dissémination de l'intégralité de l'échelle de masse (multiples et sous-multiples du kilogramme) dans les laboratoires nationaux de métrologie. En plus de ses limitations intrinsèques [3], le fait que la définition actuelle du kilogramme ne soit pas associée à celle d'un air de composition standardisée ne contribue certainement pas à améliorer sa stabilité.

Pourquoi mesurer sous vide ?

Plusieurs expériences ayant pour but d'améliorer la définition du kilogramme sont actives depuis de nombreuses



1 : Le nouveau comparateur de masse de 1 kg fonctionnant sous vide.

années [4]. Que ce soit pour le projet international «Avogadro», pour le projet allemand d'accumulation ionique ou pour les expériences de balance de Watt, la nécessité de réaliser des déterminations de masse de très haute précision sous vide s'est imposée pour diverses raisons techniques et scientifiques.

Par exemple dans le cas de la balance de Watt, l'indice de réfraction de l'air est un facteur d'influence qui empêcherait d'atteindre l'objectif visé

pour les mesures de vitesse. L'un des avantages de la détermination de masse sous vide est la «disparition» de la poussée d'Archimède. En revanche l'équilibre de l'interaction de la surface de l'étalon de masse utilisé avec son environnement s'en trouve fortement modifié et se doit d'être étudié en détail.

Comportement d'une masse étalon sous vide

A la surface d'un étalon de masse s'établit un équilibre (thermo) dyna-

mique avec l'environnement. Selon les conditions (matériau, état de surface, propreté, température . . .) l'équilibre entre la surface et l'environnement est modifié. Cela signifie que pour des conditions fixées il existe toujours un certain nombre d'atomes et de particules adsorbées en surface. Ces particules liées à l'étalon par des phénomènes physiques et chimiques contribuent à sa masse lorsque la mesure a lieu dans l'air. L'équilibre entre la surface d'un étalon de masse et son environnement va être fortement modifié lorsque celui-ci est placé sous vide.

L'importance de cette modification va dépendre des conditions évoquées précédemment et du niveau de vide utilisé. Une diminution de la pression du mélange de gaz dans lequel il est plongé va entraîner, dans tous les cas, une diminution du phénomène d'adsorption. La conséquence immédiate est que la masse d'un étalon sera inférieure sous vide. Cet effet peut être mesuré avec un comparateur de masse qui fonctionne sous vide. Les couches résiduelles peuvent être étudiées qualitativement par des méthodes usuelles d'analyse de surface. Le nouveau projet d'analyse de surface du laboratoire de masse combine ces deux méthodes (voir encadré «Projet «Analyse de surface par méthode couplée»»).

La continuité de l'échelle de masse

Selon une définition future, la réalisation de l'unité masse aura vraisemblablement lieu sous vide. La dissémination de cette unité continuera pour des raisons pratiques évidentes à avoir lieu dans l'environnement dans lequel nous vivons (l'air à pression atmosphérique) par les méthodes classiques de la métrologie des masses.

Le lien entre la réalisation sous vide et la dissémination dans l'air doit être établi en fonction de tous les paramètres d'influence concernés. C'est l'objet principal des études actuelles du laboratoire de masse, réalisées avec des paires d'étalons de même masse et de surface différente (voir encadré «Second prototype national du kilogramme»). La différence de masse entre l'air et le vide pour de tels objets

Projet «Analyse de surface par méthode couplée»

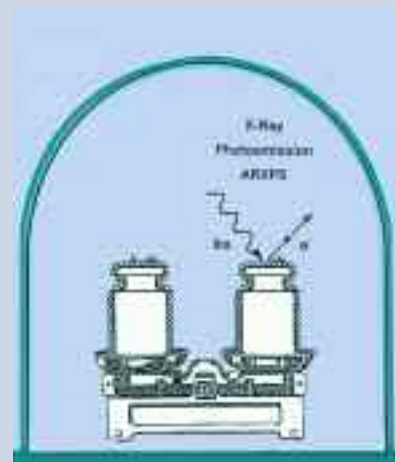
Ce projet consiste en l'association d'une méthode d'analyse de surface (fluorescence X) à un comparateur de masse «classique» fonctionnant sous vide. Cette nouvelle méthode est totalement inédite. Elle doit permettre d'effectuer des analyses quantitatives de la composition chimique des couches adsorbées (profils en coupe) sur des étalons de masse dans des conditions de vide strictement identiques à celles utilisées lors du pesage.

La méthode d'analyse de surface choisie est la spectroscopie de photoélectrons X à résolution angulaire (Angle Resolved X-Ray Photoelectron Spectroscopy, ARXPS). Il s'agit d'une méthode non destructive qui peut être employée directement sur des étalons de masse. La détermination de la différence de masse entre deux objets obtenus par pesage dans l'air et sous vide (méthode gravimétrique) est appliquée aux mêmes échantillons dans le même environnement.

L'instrumentation en cours de développement sera directement appliquée aux nouveaux matériaux candidats pour une utilisation comme masse de test pour l'expérience de la balance de Watt. Les analyses effectuées permettront de valider le modèle de comportement ainsi que le choix final du matériau. Elles permettront, en outre, de caractériser le matériau choisi de manière à assurer la continuité de l'échelle de masse entre l'air et le vide.

La méthode couplée (ARXPS et méthode gravimétrique) devra aussi apporter des enseignements sur la stabilité et la reproductibilité de la masse, à court et à long terme, pour des cycles air-vide et différentes conditions ambiantes. Elle devrait finalement permettre de définir les conditions d'utilisation et de stockage de ces étalons de manière à optimiser leur stabilité à long terme.

Le projet a débuté en mars 2004 sous la direction de Peter Fuchs et avec la participation active de Simon Thies. Les premiers résultats expérimentaux sont attendus avant la fin de 2005. Le système sera totalement opérationnel en 2006.



2 : Schéma du projet d'analyse de surface par méthode couplée.

permet la détermination de la couche totale adsorbée en surface. Cette caractérisation est indispensable pour assurer le passage d'une échelle de masse réalisée dans le vide à l'échelle de masse que nous connaissons.

Les buts du projet d'analyse de surface par méthode couplée sont de mettre en place une installation expérimentale pour l'analyse de surface sur les mêmes échantillons et dans les mêmes conditions que celles régnant dans un comparateur de masse sous vide, de choisir le matériau optimal pour la réalisation de la masse de test pour la balance de Watt de METAS et finalement de caractériser en détail le matériau choisi afin d'assurer la traçabilité et la meilleure reproductibilité possible du passage air-vide.

Sachant que le taux et la vitesse de contamination des surfaces sont proportionnels au niveau de vide et sont directement liés à l'environnement immédiat auquel les surfaces sont soumises,

la qualité de la caractérisation du vide (niveau de vide et gaz résiduels) employé à ce jour par plusieurs laboratoires pour l'étude du passage air-vide s'est avérée être nettement insuffisante.

Pour cette raison, un effort tout particulier a été produit pour assurer la compatibilité des matériaux de construction et la «qualité» du vide du comparateur de masse et du système d'analyse dès la phase de planification du projet.

Certains métrologistes optimistes pensent que le temps de redéfinir le kilogramme sur la base de constantes fondamentales est déjà arrivé [5]. Quelle que soit la date à laquelle cette nouvelle définition entrera en vigueur et quelle que soit la solution retenue, la détermination de masse sous vide et le passage air-vide sont des domaines clés que les spécialistes de la métrologie de masse devront maîtriser pour la réalisation pratique et la dissémination de l'unité de masse.

Second prototype national du kilogramme

Le prototype national du kilogramme au sommet de la hiérarchie des étalons de masse en Suisse est le prototype N° 38. Il a été élaboré au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) et attribué à notre pays en 1889 à la signature de la Convention du Mètre.

Afin de ne pas altérer sa stabilité (de l'ordre de 0.000 6 mg par année), en modifiant l'équilibre des couches adsorbées en surface, il n'est pas possible de mettre ce prototype sous vide. C'est la raison pour laquelle METAS a acquis récemment un second prototype en platine-iridium. Il s'agit du prototype N° 89 qui a été ajusté définitivement au BIPM en 2003 et livré à METAS en 2004. Le hasard de la phase finale de l'ajustage au BIPM à l'aide d'une pâte diamantée a voulu que la masse du prototype N° 89 ne soit plus élevée de celle du prototype N° 38 que de 0.013 mg. Avant sa livraison à METAS par valise diplomatique ce nouveau prototype a subi une étude de stabilité au BIPM durant 11 mois.

Ce prototype sera utilisé exclusivement sous vide en association avec un empilement de disques de 1 kg du même matériau. Ce couple d'étalon, qui sera conservé en permanence dans les mêmes conditions, servira de référence pour la caractérisation du passage air-vide.



3 : Le prototype national du kilogramme N° 89 sera utilisé et conservé exclusivement sous vide.

Références

- [1] B. Jeckelmann, Über die Entwicklung des Internationalen Einheitensystems, metINFO, Vol. 11, No. 3, 2004.
- [2] Le Système international d'unités, BIPM, 7^e édition, 1998.
- [3] B. Jeckelmann, W. Beer, Hat das Urkilogramm ausgedient? OFMETInfo, Vol.5, No. 2, 1998.
- [4] W. Schwitz, B. Jeckelmann, P. Richard, Towards a new kilogram definition based on a fundamental constant, C. R. Physique 5 (2004), pp. 881-892.
- [5] I. M. Mills, P. J. Mohr, T. J. Quinn, B. N. Taylor, E. R. Williams, Redefinition of the kilogram: A decision whose time has come, Metrologia, Vol. 42, No. 2, 2005.