

# Projet « Balance du watt »

## “Watt balance” project

### 1. Introduction

Le projet français de balance du watt a pour but de raccorder l'unité de masse à une constante fondamentale de la physique ( $h$ , la constante de Planck), en comparant une puissance d'origine mécanique à une puissance d'origine électromagnétique déterminée à partir de mesures de tension et de résistance par comparaison à l'effet Josephson et l'effet Hall quantique.

Ce projet est réalisé par la LNE/DMSI, le LNE-INM et le LNE-SYRTE.

L'année 2008 a été mise à profit pour démarrer le montage de l'ensemble de l'expérience et pour réaliser le système de levage de la partie supérieure de la cuve.

Enfin, notons que, dans le cadre de l'appel à projet iMERA-Plus de la Commission européenne (pour permettre le financement de projets de recherche de l'EMRP), le projet e-MASS a démarré en 2008 (*The watt balance route towards a new definition of the kilogram*), piloté par le LNE.

### 2. JRP e-MASS

Le projet « balance du watt » fait actuellement l'objet d'un JRP européen (*Joint Research Project*) dont les partenaires sont le METAS (Suisse), l'INRIM (Italie), le LNE, le LNE-INM et le LNE-SYRTE. D'une durée de trois ans, il a officiellement débuté le 1<sup>er</sup> mai 2008.

Il a pour but de traiter les points les plus critiques des différents projets de balance du watt comme :

- les alignements, par le développement et l'utilisation de dispositifs mécaniques et optiques destinés à l'alignement des différents éléments de la balance du watt, mais aussi à la détermination de leurs mouvements parasites lors du déroulement des mesures. Les estimations des incertitudes liées à ces alignements seront ensuite examinées ;
- l'induction magnétique, par la compensation des variations du champ magnétique local et l'étude de l'influence de l'hystérésis du circuit magnétique ;
- le bruit, par l'amélioration et l'implantation du dispositif de contrôle de vitesse nécessaire à la

réalisation de la phase dynamique de l'expérience acquise ;

- la gravimétrie, par l'évaluation et l'amélioration des sources d'incertitude rencontrées sur trois types de gravimètres absolus. Une étude du transfert de la valeur locale de l'accélération de la pesanteur au centre de gravité de la masse étalon de la balance du watt sera effectuée.

Enfin, une étude des meilleures solutions pour la réalisation des balances du watt du futur sera menée, afin de diffuser auprès des organismes intéressés les questionnements liés à cette expérience.

### 3. Projet « balance du watt »

#### 3.1. Conception de dispositifs mécaniques

Les travaux ont principalement porté sur la réalisation de la cuve à vide et la conception de son système de manutention. Sa réalisation et son montage permettront l'implantation de la structure de la balance dans son environnement final. Ces travaux ont été complétés par la définition du système de pompage de la cuve à vide.

De plus, le dispositif mécanique de pré-alignement du système de guidage dans la structure de la balance a été défini. Il repose sur la mesure de la position d'une sphère de référence fixée au plateau mobile du dispositif de guidage dont la position est déterminée, à plusieurs altitudes, par un ensemble de capteurs capacitifs supportés par un plateau tournant dont l'axe est aligné sur la verticale par inclinométrie.

#### 3.2. Caractérisation du circuit magnétique

Le circuit magnétique, après démontage et remontage a été à nouveau caractérisé. Le profil de l'entrefer a été déterminé de même que le profil de champ résultant, profils conformes aux prévisions (coaxialité des pôles inférieure à  $1\ \mu\text{m}$ , variation de l'induction dans la zone utile de l'entrefer inférieure à  $2 \cdot 10^{-4}$  en valeur relative, induction de l'ordre de 0,94 T). De nombreux efforts ont été entrepris pour l'amélioration du dispositif de mesure de l'alignement du plan magnétique moyen du circuit sur le plan

horizontal, incluant un ensemble de détection à effet Faraday, L'utilisation de ce détecteur est un préalable au transfert du circuit magnétique dans la structure de la balance.

La mesure des variations du champ magnétique local, principalement d'origine anthropique, a été effectuée, en préambule à la réalisation d'un ensemble de bobines permettant leur compensation au niveau du circuit magnétique. A terme, cette compensation permettra une caractérisation fine du comportement (hystérésis) du circuit magnétique.

### 3.3. Amélioration du fléau du comparateur de force et de ses suspensions

Les mesures effectuées en 2007, consécutivement à l'installation sur le fléau de capteurs optiques de position, ont permis de mettre en évidence sa sensibilité aux vibrations. Afin de poursuivre son étude au-delà des limitations apportées par ce phénomène, un nouveau support a été conçu et le fléau remonté. Cette action s'est accompagnée de la poursuite de l'étude d'amortisseurs à ballonnement de liquide susceptible de réduire les oscillations des suspensions du fléau. Une importance particulière a été attachée à la combinaison de plusieurs amortisseurs accordés sur les diverses fréquences propres de la suspension.

### 3.4. Masses étalons

Le projet Euramet n° 734 dont l'objet était de choisir des matériaux pouvant convenir pour la réalisation de la masse de transfert utilisée dans l'expérience de balance du watt, a permis de sélectionner trois matériaux pour la suite des études : l'alliage quaternaire en or platiné, l'iridium pur et un alliage de platine à l'état amorphe (rapport final disponible au LNE-INM/CNAM).

Actuellement, outre des masses et empilements en Pt-Ir, on dispose de deux empilements de cinq disques de 200 g, polis et ajustés à 1 kg, l'un en or platiné et l'autre en iridium pur. Des boîtes de transport étanches permettant leur transport et leur conservation sous vide ou en atmosphère contrôlée (argon, azote) ont été réalisées. La masse volumique des disques a été déterminée par pesée hydrostatique.

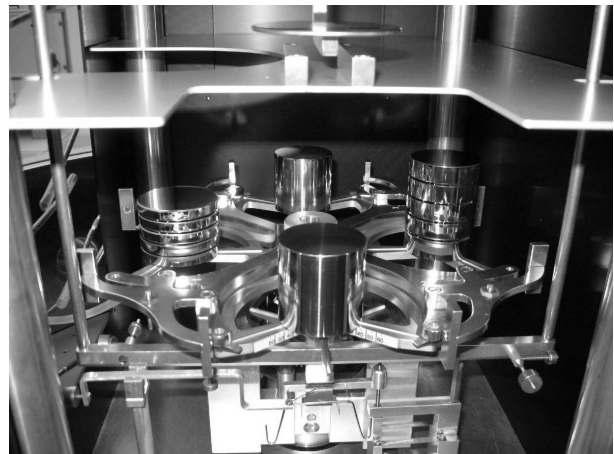
L'étude gravimétrique des différents matériaux a débuté par le raccordement des kilogrammes prototypes en platine iridié JM15, Pt17 et Pt44 au prototype PtIV (lui-même raccordé au Pt35) et les 1<sup>res</sup> comparaisons entre les empilements et ces étalons prototypes ont été initiées.

Plusieurs actions ont été entreprises pour compléter la connaissance des matériaux évalués :

- détermination de la rugosité par rugosimétrie optique sur deux échantillons d'iridium et d'alliage Au-Pt-Ag-Cu polis semi-manuellement jusqu'à un

grain final de 1  $\mu\text{m}$  ; (hauteur quadratique moyenne de l'ordre de 2 nm contre 3 nm pour le Pt-Ir) ;

- étude sur la détermination des molécules physisorbées par TDS en fonction des conditions de conservation à court terme (air, vide, azote et argon) sur l'Ir et le Pt-Ir. La confirmation des résultats obtenus avec l'argon, bon candidat par rapport à l'azote restent à confirmer pour une conservation long terme des matériaux choisis. En vue de ces études, le sas du banc de TDS a été modifié afin d'accueillir en 2009 une boîte à gants qui sera utilisée pour l'ouverture des boîtes de transport sous atmosphère contrôlée.



Etude gravimétrique sur des masses d'Au-Pt et d'Ir

En complément, une étude comparative de deux méthodes de nettoyage (étude des contaminants et études gravimétriques sur des artefacts de Pt-Ir et d'Ir de grande surface de 100 g) montre l'efficacité du nettoyage par thermo-désorption en comparaison d'un nettoyage-lavage BIPM. Néanmoins, lors d'une remise à l'air la re-contamination des échantillons est très rapide.

De plus, des analyses de la contamination de surface sur les différents matériaux ont été réalisées par l'Institut des Nanosciences de Paris et par le laboratoire Sciences et Surfaces de Lyon dans le cadre d'une action d'incitation DRST 2008. Les matériaux, polis selon deux méthodes différentes et ayant subi cinq nettoyages différents, ont été analysés en XPS, ToF-SIMS et par faisceau d'ions rapides. Les résultats montrent une certaine variabilité des éléments contenus en extrême surface selon le polissage. Ce phénomène est moins significatif selon la procédure de nettoyage, mis à part pour l'UV/O<sub>3</sub> qui a tendance à oxyder les éléments tels que le cuivre, l'argent et le phosphore. Parmi les matériaux étudiés, l'iridium pur semble être celui qui est le moins sensible à la contamination de surface avec des taux d'oxygène deux fois plus faibles que les autres matériaux. Toutefois, une analyse détaillée des résultats doit être effectuée avec les deux organismes et les résultats doivent être confirmés par les mesures gravimétriques.

### 3.5. Interférométrie

Un nouveau laser asservi sur l'iode et développé dans les locaux de l'université de Versailles a été transféré, avec son électronique, dans les locaux du LNE-Trappes. Ce laser est associé à un interféromètre prototype dont on a effectué, dans l'air, une première comparaison avec l'interféromètre en lumière rouge (630 nm) utilisé jusqu'à présent. Un premier *design* d'interféromètre compact, adapté à la géométrie de la balance du watt a été ébauchée à partir duquel la majorité des composants optiques ont été définis et approvisionnés.

Par ailleurs, une action a été initiée dans le cadre du JRP e-MASS avec le METAS pour la réalisation de capteurs de position miniaturisés qui permettront de déterminer les mouvements parasites de la bobine mobile lors de son réglage et lors des mesures.

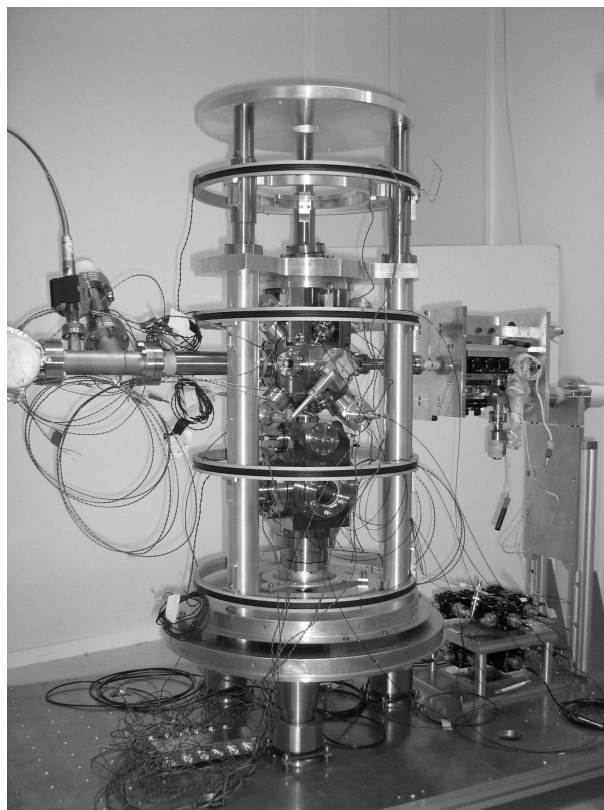
### 3.6. Gravimétrie

Le montage de l'enceinte à vide finale a été achevé, avec l'installation des optiques sous vide (miroir et lame quart d'onde), du piège magnéto-optique à deux dimensions et des pompes à vide. L'ensemble a ensuite été étuvé pendant un mois à une température de 120 °C. Des nouveaux collimateurs ont été installés. Récemment, les pièges magnéto-optiques (PMO 2D et 3D) ont été obtenus dans la nouvelle enceinte. Les dispositifs de détection ont été fabriqués et anodisés ; ils sont en cours de montage.

La première enceinte a été modifiée après épuisement de la réserve de rubidium pour fonctionner à partir d'une vapeur et non plus du PMO 2D. Le biais lié à l'indice de la vapeur a été mesuré. Ensuite, des tests de nouvelles géométries d'interféromètre ont été réalisés. La première utilise les deux paires de faisceaux Raman pour réaliser un interféromètre d'aire double et insensible à la différence de phase des faisceaux Raman. Pour la seconde une pyramide creuse a été placée sous vide, dans laquelle on peut réaliser le PMO 3D avec un seul faisceau laser, qui est ensuite utilisé pour réaliser l'interféromètre.

Un forage jusque -45 m a été effectué proche des laboratoires de la balance du watt et de gravimétrie. Un

capteur de niveau hydrostatique y a été installé afin de suivre l'évolution de la nappe phréatique des sables de Fontainebleau à -33 m.



Gravimètre à atomes froids du LNE-SYRTE.

## 4. Conclusion

L'année 2008 a permis de finaliser les différentes parties de l'instrumentation de la balance proprement dite, mais aussi de tout l'ensemble cuve-enceinte à vide. Ceci devrait permettre un premier montage de la balance du watt courant 2009. De même, pour le gravimètre à atomes froids, le nouveau montage devrait faire en sorte que le gravimètre absolu puisse participer en 2009 à une comparaison internationale organisée par le BIPM ; ce sera la première fois pour un gravimètre de ce type.