

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 (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.

Les travaux entrepris en 2006 ont permis de poursuivre l'amélioration d'un certain nombre des éléments constitutifs de la balance, transférés sur le site de Trappes, et de les faire fonctionner entre eux. L'objectif prévu pour fin 2007 - début 2008, est le montage complet d'un premier prototype de la balance du watt.

2. Éléments mécaniques

Suite aux mesures expérimentales tout au long de l'année 2006, et afin d'améliorer le maintien de la partie mobile, une conception d'un nouveau système de guidage en translation a été définie (fig. 1), en vue de réduire l'effet de rotation indésirable présente sur le précédent prototype. Cette conception a par ailleurs permis de dégager les grandes lignes de la structure définitive de la balance du watt.

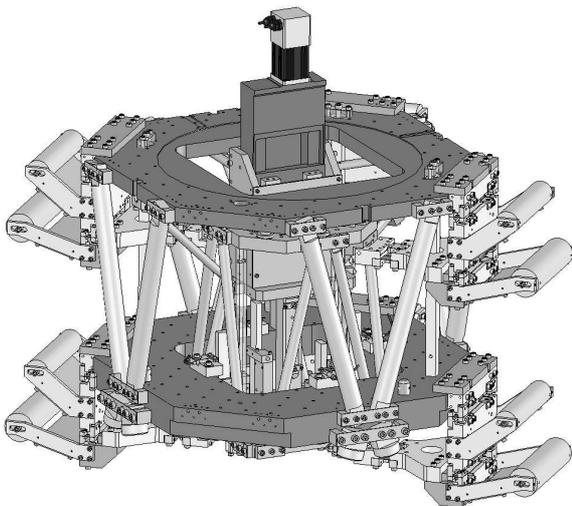


Fig. 1. – Dispositif de guidage en translation.

3. Comparateur de force

Le prototype de fléau, conçu au LNE-INM, a été transféré sur le site de Trappes à la fin de l'année 2005. Son étude, tant expérimentale que théorique, et son amélioration ont été poursuivies en 2006.

Une nouvelle méthode de mesure directe de la sensibilité angulaire a été développée. Elle complète l'estimation faite jusqu'à maintenant à partir de la période d'oscillation du fléau. La sensibilité angulaire est déduite automatiquement par une mesure simultanée de la tension aux bornes de la résistance étalon et du déplacement du fléau à l'aide d'un capteur à fibre optique.

Une étude théorique, selon un modèle simple, du comportement dynamique du fléau et des suspensions a été réalisée par le LNE-INM. Cette étude a été complétée au LNE par une détermination expérimentale du diagramme de Bode et de la fonction de transfert du fléau.

Par ailleurs, un capteur optique innovant a été développé afin d'assurer la répétabilité de positionnement du fléau. La solution retenue utilise les propriétés de propagation des faisceaux gaussiens et de leur modulation spatiale. Le principe de la modulation spatiale consiste à utiliser deux faisceaux laser parallèles modulés en opposition de phase. Ces deux faisceaux sont focalisés sur une fente solidaire de l'objet à positionner. En sortie de fente, les faisceaux résultants sont captés par une photodiode. Le signal électrique en sortie de la photodiode est alors démodulé par un amplificateur à détection synchrone.

La résolution du capteur est de 5 nm, soit une résolution angulaire de 50 nrad pour un bras de fléau de 100 mm, ce qui permettra de détecter une variation de masse δm de 0,2 μg pour une sensibilité théorique de 250 $\text{rad}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Le capteur présenté fait l'objet de dépôt d'un brevet d'invention.

4. Étalon de masse de transfert

L'étude relative à la sélection du matériau pour la réalisation de la masse de transfert de l'expérience est réalisée dans le cadre du projet Euromet Mass 734. Dans cette étude, le platine iridié est pris comme matériau de

référence. Considérant l'avancement des travaux, il a été décidé de poursuivre l'étude jusqu'en 2007.

Les exercices précédents ont permis de sélectionner trois matériaux répondant à la majorité des critères fixés par le cahier des charges. Il s'agit d'un alliage d'or quaternaire, de l'iridium pur et plus récemment d'un alliage de platine à l'état amorphe. Ces trois matériaux doivent désormais être caractérisés en terme de stabilité de la masse lors du transfert air-vide par comparaison au platine iridié. En 2006, des études importantes ont été réalisées, principalement sur les alliages d'or quaternaire et le platine amorphe.

4.1. Alliage quaternaire à bas d'or

L'exercice 2005 avait permis de sélectionner un alliage quaternaire à base d'or (Au75-Pt4-Ag9-Cu12) présentant les caractéristiques requises en termes de propriétés physiques (magnétisme et dureté) et d'homogénéité en volume. Ces deux propriétés n'avaient pas pu être atteintes simultanément sur les précédents matériaux. Ce matériau est à l'heure actuelle un très bon candidat pour la réalisation de l'étalon de transfert. Six disques de 200 g et deux échantillons de ce matériau, réalisés par la société suisse PX Group, ont été livrés au LNE-INM fin 2006. Ces différents échantillons vont permettre de réaliser l'étude gravimétrique par rapport au platine iridié et à l'iridium pur, ainsi que la mise au point des procédures de polissage et de nettoyage.

4.2. Les alliages de platine amorphe

Les alliages amorphes de métaux précieux avaient été évoqués par R. Davis (BIPM) en 2005. Ce type de matériaux présente actuellement un intérêt croissant dans l'industrie bijoutière grâce à leurs propriétés physiques remarquables : dureté élevée, forte résistance à la corrosion et à l'usure. Toutefois, aucun fournisseur n'étant en mesure d'élaborer des échantillons de grandes dimensions (500 g), pour des alliages à base d'or, cette piste fut rapidement écartée.

Les recherches se sont orientées vers des alliages similaires (même état structural) mais à base de platine. Elles ont permis d'obtenir des échantillons de dimensions suffisantes avec des taux de porosité très faibles (0,004 %). Deux échantillons de 16 mm de diamètre et 6 mm de hauteur ont été commandés afin d'effectuer une caractérisation complète du matériau. La susceptibilité magnétique mesurée était de $\chi_v = -1,7 \cdot 10^{-5}$, la plus faible de tous les matériaux précédemment étudiés. De plus, cette valeur négative (synonyme de diamagnétisme) est également bénéfique, un étalon présentant cette spécificité ayant tendance à repousser les champs magnétiques environnants.

Différentes analyses ont été réalisées sur l'alliage au Centre des Matériaux de l'ENSMP. La dureté a été évaluée à 430 ± 5 Hv1, soit deux à trois fois plus dur que l'alliage de référence en Pt-Ir.

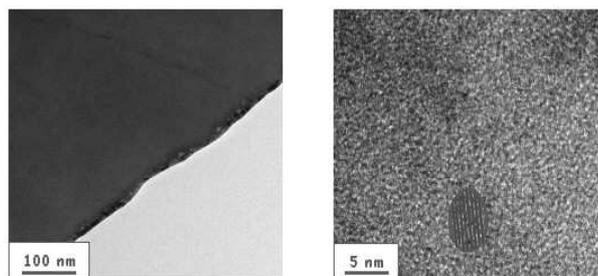


Fig. 2. – Micrographies MET de l'alliage de platine amorphe.

Au vu de ces résultats, le matériau se place comme un très bon candidat pour la réalisation de l'étalon de masse de transfert de l'expérience. A la suite d'analyses complémentaires, la décision sera prise quant à la réalisation de masses de 500 g pour l'étude gravimétrique.

5. Mesure et contrôle de vitesse et inclinométrie

L'interféromètre, transféré à Trappes à la fin de l'année 2005 a été adapté au système de guidage prototype, et l'étude de l'asservissement en vitesse de masses importantes se poursuit actuellement. L'étude en cours d'un laser Nd:YAG asservi sur l'iode permettra à terme d'étendre les possibilités actuelles de contrôle de vitesse à un asservissement en trois points de la vitesse de la bobine mobile.

De même, un nouvel inclinomètre est étudié sur le principe d'un fonctionnement avec deux liquides d'indices différents et de masses volumiques différentes, non miscibles.

6. Références électriques et circuit magnétique

6.1. Références électriques

Le projet « *iMERA Quickstart* », réalisation en coopération avec le NPL et la PTB d'un contrôleur temps réel dédié à l'étalon de tension Josephson, a été terminé. Cet équipement doit permettre d'asservir, pendant la phase dynamique, la tension de référence Josephson sur la tension aux bornes de la bobine, et d'éviter la saturation de l'étage d'entrée du comparateur de tension.

La source de polarisation et son contrôleur temps réel ont été finalisés et sont, dans la configuration actuelle, tout à fait adaptés à la procédure de mesure envisagée pour la phase dynamique.

6.2. Circuit magnétique

Les éléments du circuit qui définissent la géométrie de l'entrefer, c'est-à-dire les deux pôles et la bague qui permet de les positionner l'un par rapport à l'autre, ont été caractérisés dimensionnellement, sur machine à mesurer tridimensionnelle, dans deux configurations au LNE Nîmes.

Le circuit magnétique a été ensuite assemblé (avec l'aimant) et une première caractérisation a été effectuée. Les mesures préliminaires ont montré que le champ à l'intérieur de l'entrefer est sensible au champ magnétique régnant à l'extérieur de celui-ci et à ses composantes dépendantes du temps. Les variations maximales de champ constatées sont de l'ordre de 200 nT.



Fig. 3. – Montage du circuit magnétique.

Afin de pouvoir affiner les résultats obtenus et aligner le champ magnétique dans le plan horizontal, un dispositif spécifique a été conçu.

7. Gravimétrie

Les principales études en gravimétrie absolue ont été ciblées sur l'amélioration de la sensibilité à court terme du gravimètre à atomes froids et sur l'évaluation des différents effets systématiques.

Entre autres, les études ont porté sur la réduction du bruit dans la bande 50 Hz à 100 Hz, sur la mise en œuvre de la chaîne de synthèse de fréquence définitive, l'amélioration des trajectoires des atomes, l'alignement des faisceaux Raman, l'influence de la puissance des

faisceaux laser, de leur polarisation et du champ magnétique sur la vitesse des atomes. Les performances du gravimètre sont maintenant sensiblement égales à celles des meilleurs gravimètres à coin de cube.

Parallèlement, l'exploitation du gravimètre relatif a permis de compléter la cartographie gravimétrique du laboratoire et d'en déterminer les gradients. Dans l'optique de réaliser le transfert de g avec une incertitude relative de 10^{-9} et afin de caractériser au mieux le site de Trappes, les processus de mesures ont été optimisés en exploitant au maximum les possibilités du gravimètre relatif CG-5. Les sessions de mesures de caractérisation ont permis d'effectuer la cartographie horizontale des deux dalles selon le maillage $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ repérant les 75 points de mesures.

Les mesures effectuées ont été confirmées par une comparaison de trois gravimètres absolus de type FG5.

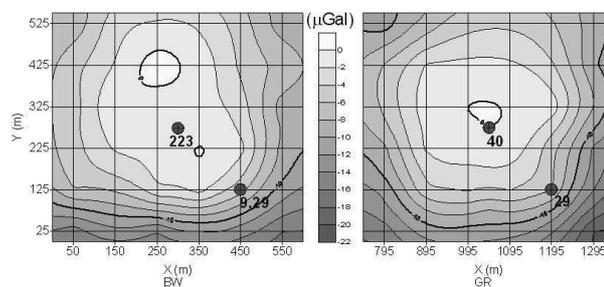


Fig. 4. – Cartographie des dalles sous forme d'isoGal. Le point central de la salle gravimétrie (40 GR) est pris comme référence. Les quatre points indiqués ont été mesurés de manière absolue lors de la comparaison.

8. Conclusion

L'année 2006 a permis, après le transfert d'éléments importants de la balance du watt sur le site de Trappes, de faire fonctionner conjointement un certain nombre d'entre eux en vue de l'assemblage de l'expérience. Par ailleurs, certains éléments ont été terminés. Plusieurs dispositifs mécaniques ont fait l'objet d'importants efforts : conception du système de guidage définitif, conception du dispositif permettant l'alignement du champ magnétique dans le plan horizontal. Ils ont contribué à définir les grandes lignes du support de la balance du watt.