

# 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.

L'année 2007 a été mise à profit pour concevoir la mécanique définitive de l'expérience (montage du système de guidage en translation - définitif, conception de la cuve à vide, conception et fabrication du piètement et du support orientable du circuit magnétique). Seule la conception du système de levage de la partie supérieure de la cuve n'a pu être abordée.

L'objectif prévu pour 2008, est le montage complet d'un premier prototype de la balance du watt.

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 (*The watt balance route towards a new definition of the kilogram*), au sein duquel collaboreront le METAS, l'INRIM, le LNE-INM, le LNE-SYRTE et le LNE, a été sélectionné. Ce projet sera piloté par le LNE.

### 2. Intégration mécanique

La conception et la fabrication de la structure de l'expérience a été poursuivie. L'objectif est d'en assembler la partie mécanique sur laquelle se grefferont les éléments tels que interféromètre, fléau et références électriques. L'effort a porté sur trois éléments essentiels : la cuve à vide, le dispositif de guidage et le support de l'aimant.

La cuve à vide comportera une partie basse qui intégrera la majorité des liaisons entre extérieur et intérieur, la partie haute comportant une ouverture destinée à la mise en place d'un sas pour le transfert de masse. Le dispositif de guidage dans une version définitive a été réalisé et les premières caractérisations du mouvement à partir de ce système ont été faites. Le positionnement du circuit magnétique par rapport à la bobine et par rapport à la verticale locale nécessite un réglage fin ; un support a été conçu de façon à permettre

un centrage du circuit magnétique le plus parfait possible. La résolution du système de réglage est de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$  et  $1\ \mu\text{rad}$ .

### 3. Comparateur de force et suspension

L'étude du comparateur de forces a été poursuivie. En particulier, le détecteur optique de position, qui assure la répétabilité du positionnement du fléau, a été breveté et adapté au fléau. La sensibilité de ce dispositif est estimée à  $2\ \text{mV}\cdot\text{nm}^{-1}$ . Le fléau a aussi fait l'objet de modifications au niveau des pivots à lames flexibles.

Par ailleurs, la réalisation d'une nouvelle bobine permet au prototype de comparateur de forces de fonctionner dans des conditions similaires aux conditions définitives de l'expérience. L'équilibre du fléau est obtenu avec la source de courant programmable et un contrôleur temps réel pour lequel un algorithme d'asservissement PID a été adapté, ceci dans une configuration similaire à celle qui sera utilisée dans le système définitif. Le gain obtenu consécutivement à ces modifications est d'un facteur de l'ordre de cent par rapport aux résultats obtenus lors de l'exercice précédent. Le développement des systèmes de butées et d'échangeur de masses restent cependant à poursuivre.

### 4. Étalon de masse de transfert

Les différents échantillons nécessaires à l'étude du matériau des masses étalons de la balance du watt ont fait l'objet de nombreux travaux d'ajustement et de polissage. On dispose actuellement de l'ensemble des éléments nécessaires à l'étude du passage air-vide et de l'influence des méthodes de nettoyage. On notera que pour ce dernier point, un lot d'échantillons a été élaboré pour l'étude des contaminants de surface des différents alliages par la société Science et Surface et par l'Institut des Nano-Sciences de Paris, dans le cadre d'une action d'incitation du LNE/DRST.

#### 4.1. Étude de surface de l'alliage platine-iridium

Un cylindre en Pt-Ir, nettoyé par un nettoyage/lavage BIPM puis conservé dans l'air pendant six mois, a été étudié. Lors de la première thermodésorption à  $500\ ^\circ\text{C}$ , une forte désorption d'hydrogène et de dioxyde de carbone a été observée, et en plus faible quantité, des

composés ou radicaux tels que  $C_2H_2$ ,  $C_2H_5$ ,  $C_2H_5OH$ ,  $C_3H_3$ ,  $C_3H_5$ . Ces derniers correspondent à des fragments de molécule d'éthanol ou d'éther.

Après la remise à l'air (passage air-vide), le cylindre a été conservé sous cloche pendant une semaine dans une atmosphère propre. La seconde thermodésorption à  $500\text{ }^\circ\text{C}$  montre une diminution significative de la désorption de molécules. En particulier, il n'y a plus de traces d'éthanol, d'éther et de molécules ayant une masse atomique supérieure à 45. Néanmoins, il subsiste des molécules présentes dans l'air. Le nettoyage par thermodésorption permet de retirer une quantité importante de contaminants sans en rajouter, contrairement aux autres méthodes de nettoyage.

#### 4.2. Caractérisation de l'état de surface de disques en iridium pur

Des études de caractérisation d'état de surface de deux disques en iridium ont été entreprises afin de pouvoir faire les études gravimétriques par la suite. Les résultats montrent que la surface de ces deux cylindres présentent une bonne homogénéité et une rugosité de l'ordre de  $4\text{ nm}$  dans le domaine accessible aux mesures optiques. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus avec le platine iridié.

Par ailleurs, une étude du comportement superficiel sur un artefact de grande surface en iridium (bande polie de  $100\text{ g}$  en iridium) est en cours. Cette étude porte sur le transfert air-vide et sur le nettoyage. L'évolution constatée de cet artefact est couplée avec l'analyse des contaminants de surface. Les premiers résultats de passage air-vide montrent une désorption de  $0,15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  lors d'une première mise sous vide à  $10^{-6}\text{ Pa}$ .

#### 5. Mesure et contrôle de vitesse

Dans le cas d'une faible charge, les performances de l'asservissement de la vitesse selon l'axe vertical sont meilleures que celles obtenues initialement selon un axe horizontal ( $2\cdot 10^{-9}$  sur  $100\text{ s}$ ). Les essais se sont poursuivis sous une charge de  $1,2\text{ kg}$ . Le bâti actuel (provisoire) n'ayant pas été optimisé pour minimiser les vibrations mécaniques, les premiers résultats obtenus montrent des performances dégradées à  $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Ces vibrations de grandes amplitudes ne peuvent pas encore être corrigées par l'électronique d'asservissement actuelle limitée, en partie, par la dynamique de correction du transducteur piézo-électrique utilisé lors de ces essais.

Les efforts se poursuivent pour diminuer cet écart type relatif et atteindre les performances obtenues sous faible charge ( $2\cdot 10^{-9}$  sur  $100\text{ s}$ ).

#### 6. Le circuit magnétique

Une fois le circuit assemblé, il est nécessaire de vérifier la géométrie de l'entrefer obtenu et la variation de l'intensité du champ d'induction correspondante. On

cherche à s'assurer que la distribution du champ est bien axisymétrique avec un minimum à l'endroit où sera placée la bobine pendant la phase statique. Pour ces mesures, une sonde capacitive capable de mesurer les variations de l'épaisseur de l'entrefer et une sonde à effet Hall ont été utilisées.

De plus, pour mettre en œuvre la phase statique de l'expérience, il faut aligner avec la verticale la résultante des forces de Laplace qui agit sur la bobine. Pour cela, l'axe de révolution du champ d'induction doit être vertical. Cet alignement a été réalisé en mesurant l'angle que forme la direction de cet axe de révolution avec la normale à une surface prise comme référence sur le circuit magnétique. Cette surface est définie par un anneau circulaire de diamètre  $500\text{ mm}$  environ qui appartient au pôle extérieur du circuit. Dans l'expérience, c'est cette surface qui sera alignée avec la verticale en fonction des mesures réalisées.

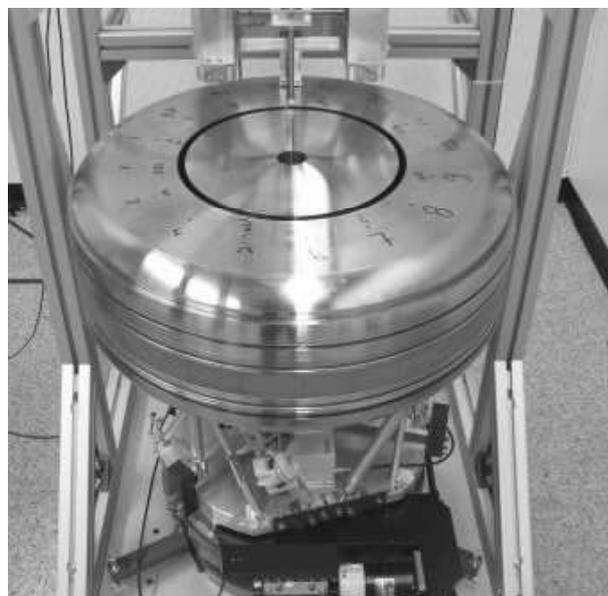


Fig. 1. – Circuit magnétique.

Pour réaliser les mesures, il faut déplacer une sonde dans tout le volume de l'entrefer. Pour cela, une machine spéciale a été conçue et fabriquée. Elle permet de déplacer une sonde dans les trois directions d'un repère cylindrique dont l'axe  $Oz$  est l'axe de révolution du circuit magnétique : un plateau tournant motorisé fait tourner le circuit magnétique, tandis que deux platines de translation motorisées déplacent la sonde dans l'entrefer, dans les directions axiale et radiale. En raison de la taille des sondes et de l'épaisseur de l'entrefer, le déplacement radial est utilisé uniquement pour la sonde à effet Hall.

Les résultats montrent qu'il existe un faible écart entre le profil de champ vertical dans l'entrefer et le profil espéré, qu'il sera cependant nécessaire de réduire en remplaçant la bague étalon du circuit magnétique.

## 7. Gravimétrie

Le dispositif final du gravimètre absolu est en cours d'assemblage et un test mécanique des blindages magnétiques a été effectué. Par ailleurs, de nouvelles optiques ont été testées, en particulier pour les faisceaux Raman.

Le filtrage numérique du signal du sismomètre a été réalisé afin de compenser l'atténuation et les déphasages de sa fonction de transfert, ceci afin d'améliorer la réjection des vibrations. Les premiers résultats ont montré un gain relativement modeste sur la sensibilité, de l'ordre de 25 %. La nuit, sans air conditionné, un record de sensibilité de  $1,4 \cdot 10^{-8} g$  sur 1 s a été obtenu. Cette limite est attribuée à des couplages d'axes dans le sismomètre.

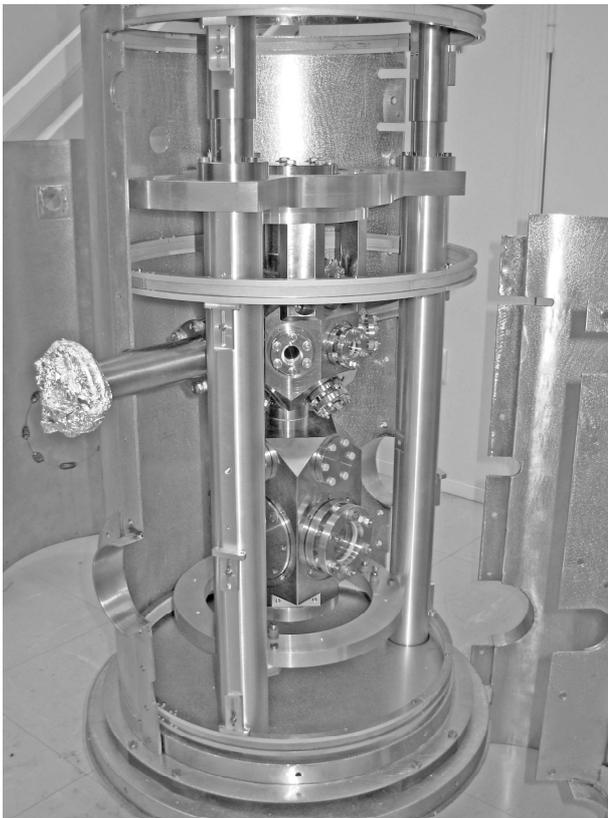


Fig. 2. – Nouvelle enceinte à vide pendant les tests d'assemblage des blindages.

Finalement, une comparaison a été réalisée entre le gravimètre du LNE-SYRTE et l'A10 de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Les résultats montrent que les données du A10 et du gravimètre atomique, comparées à un modèle de marée sont en bon accord. La valeur de  $g$  donnée par le gravimètre atomique est corrigée des effets

systématiques (sauf de l'effet Coriolis et de l'effet des aberrations). Un biais de  $16 \mu Gal$  a été observé sur la mesure du gravimètre qui peut être attribué à ces effets.

Le gravimètre relatif CG5 a mesuré en continu les variations de gravité dans la salle destinée à accueillir le gravimètre absolu, à Trappes. L'analyse des 150 premiers jours permet d'ores et déjà de corriger les mesures des effets de marées et de variations de pression atmosphérique avec une incertitude de  $0,7 \mu Gal$ . Durant cette acquisition l'instrument a été comparé pendant 4 mois à un autre CG5 de l'Université du Luxembourg fonctionnant différemment. Les mesures communes ont permis de valider le fonctionnement de leur dispositif et de confirmer la sensibilité de nos mesures. En effet, l'analyse préliminaire de données communes donne les mêmes paramètres de marées.

A partir des cartographies horizontales et verticales le modèle a été affiné, déterminant les variations de gravité dans le laboratoire. Il consiste en la modélisation des effets gravimétriques des différents éléments influents du laboratoire : massifs, murs, pieds des massifs, vide entre les massifs et les argiles composant le sol. Ce modèle permet le transfert de la gravité de n'importe quel endroit des deux massifs à n'importe quel autre endroit avec une incertitude de  $3 \mu Gal$ , assurant une contribution dans le budget total d'incertitude de la balance du watt de  $3 \cdot 10^{-9}$ . Les différences de gravité obtenues avec des gravimètres absolus ont permis de valider le modèle.

## 8. Phase dynamique

L'étude de la phase dynamique rassemble sur un même banc de mesure le système de guidage en translation et l'interféromètre destiné à asservir la vitesse de la bobine mobile. L'étude de l'asservissement du déplacement d'objets massifs a été entreprise. Les résultats obtenus montrent qu'il est nécessaire de contrôler la vitesse de la bobine en trois points. Pour ce faire, un nouvel interféromètre utilisant un laser Nd:YAG doublé en fréquence a été développé.

## 9. Conclusion

L'année 2007 a permis d'affiner un certain nombre de mesures essentielles avant l'assemblage complet du prototype. Ces mesures ont permis de revoir certains éléments importants de l'ensemble du dispositif tels que les éléments de guidage, le contrôle de vitesse, le circuit magnétique ou le gravimètre, qui ont ou seront modifiés afin de réduire au minimum les effets induisant des perturbations.