

# 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 (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 2005 ont permis de poursuivre le développement des éléments constitutifs de la balance de façon à ce qu'il soit possible de les transférer sur le site de Trappes. L'objectif est de pouvoir, dès 2006, commencer à les assembler et les faire fonctionner conjointement.

Parmi les points majeurs se trouve l'installation d'un dispositif de mesure des conditions d'environnement des laboratoires, pour le fonctionnement duquel il a été nécessaire de définir le schéma de principe du système informatique qui permettra l'exploitation de la balance.

### 2. Système de guidage et comparateur de force

De nouveaux éléments flexibles croisés, à lames rapportées, ont été intégrés au système mécanique de guidage. Le système de positionnement a été revu. La qualité de guidage (rectitude, tangage et lacet) a été améliorée et a permis, par exemple, d'obtenir des défauts de rotation sur la direction Oy de l'ordre de  $3,5 \mu\text{rad}$  sur une course de 72 mm.

Par ailleurs, le dispositif de compensation des efforts a été réalisé, mis en œuvre et caractérisé.

Un premier prototype de comparateur de force a été réalisé et monté au LNE à Trappes. Des premières expériences ont été faites pour analyser les phénomènes perturbateurs et évaluer la fonction de transfert du comparateur. Ces études permettront de définir la conception du prototype final.

### 3. Etalons de masse

En 2005, les travaux relatifs aux masses étalons se sont concrétisés au travers de la soutenance de trois thèses sur les études physico-chimiques de l'interface air-métal, la métallurgie des métaux utilisés et l'étude des états de

surface. Les études gravimétriques, les études relatives au transfert air-vide et de stabilité dans le temps, études effectuées sur les étalons de masse en Pt-10%Ir, ont été finalisées.

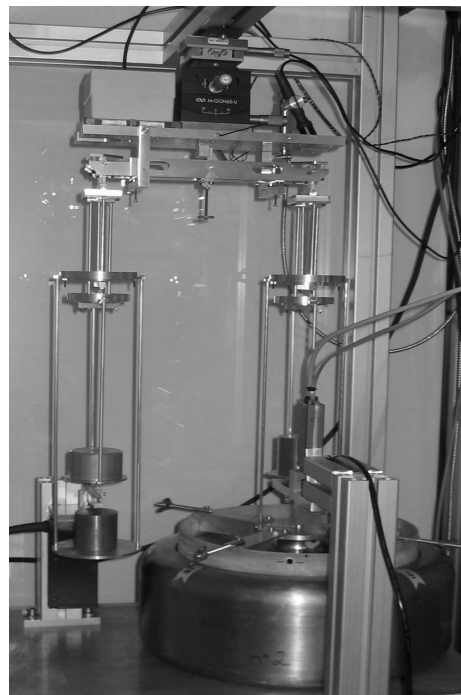


Fig. 1. – Prototype de comparateur de force avec maquette du circuit.

En ce qui concerne les étalons de transfert, plusieurs alliages ont été étudiés, en particulier des alliages binaires à base d'or. Cependant, les résultats obtenus n'ont pas été concluants particulièrement en terme d'homogénéité et de dureté. D'autres matériaux de nouvelles générations sont à l'étude, nouveaux alliages et/ou métaux purs.

### 4. Asservissement en vitesse et inclinométrie

Une amélioration d'un facteur quatre de la stabilité de la vitesse de la bobine en phase dynamique a été obtenue, par rapport à l'année précédente. L'expérience de mesure et de contrôle de vitesse a été transférée au LNE à Trappes, en vue de son assemblage avec le système de guidage et la platine de translation. Des premiers essais de bruit d'asservissement ont été effectués.

Une étude des différentes sources d'erreurs qui rentrent en jeu dans la mesure et le contrôle de la vitesse, en particulier l'alignement optique, a été réalisée. Cette expérience constitue d'ailleurs une nouvelle méthode de mesure de rapport de fréquences optiques d'exactitude à l'échelle de  $10^{-9}$ .

Par ailleurs, plusieurs études ont été faites pour évaluer la sensibilité de l'inclinomètre en fonction des différents liquides transparents possibles, et de viscosités diverses.

## 5. Circuit magnétique

Cette année a été marquée par l'aboutissement des calculs de déformation du circuit magnétique (magnétostriction, forces magnétiques, etc.) dont les résultats ont permis de définir de façon précise la forme du circuit magnétique dans l'entrefer. Ceci a conduit à la réalisation de l'usinage des faces, qui définissent l'entrefer, pour maîtriser les variations de diamètre à mieux que le micromètre. L'ensemble des pièces mécaniques qui composent le circuit magnétique est donc prêt pour le montage définitif.

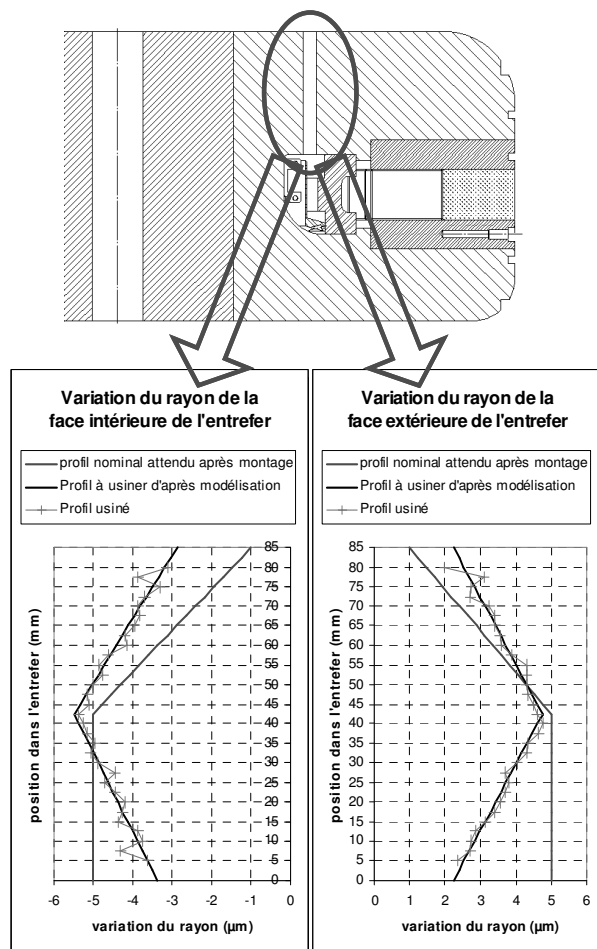


Fig. 2. – Profil de l'entrefer théorique nominal, profil théorique à usiner et profil réel usiné.

Toutefois, les effets d'hystérésis susceptibles d'apparaître sur les matériaux doux doivent être évalués avant le montage final.

## 6. Références électriques

Une des avancées les plus importantes du projet en 2005 concerne les études relatives aux différentes composantes des références électriques.

### 6.1. Etalon de tension

Plusieurs types de mesures ont été entrepris pour caractériser le réseau de jonctions Josephson programmables de la balance du watt :

- mesure de l'additivité des tensions délivrées par les sous-segments du réseau ;
- étude de la rectitude du plateau « Josephson » généré par le sous-réseau de 1 024 jonctions ;
- comparaisons directes d'une part avec un réseau classique de type SIS (couramment utilisé pour l'étalonnage de référence à diode Zener) et, d'autre part, à un réseau programmable du même type SINIS. Les incertitudes obtenues sont tout à fait satisfaisantes : de l'ordre de  $1,2 \cdot 10^{-10}$  pour la comparaison avec un réseau SIS, et de  $4,4 \cdot 10^{-11}$  pour la comparaison avec un réseau SINIS, en valeur relative.

### 6.2. Source de polarisation

Une collaboration étroite entre le NPL et le LNE s'est poursuivie pour la réalisation d'une source de polarisation pour les réseaux de jonction Josephson programmables. L'objectif est de disposer d'une source suffisamment rapide afin de pouvoir asservir la tension Josephson sur la tension aux bornes de la bobine durant la phase dynamique. La conception d'un contrôleur temps réel dédié à cette source a débuté dans le cadre d'une des actions du projet iMERA.

Tous les essais réalisés se sont avérés concluants, et permettent d'affirmer le comportement correct de la source par rapport aux objectifs définis pour : la distribution des courants de polarisation et la rapidité de cette distribution, la vérification du bruit résiduel sur les courants de polarisation, la commutation rapide de la tension de sortie du réseau, etc.

### 6.3. Source de courant programmable

Le courant de pesée devra être asservi sur la position horizontale du fléau du comparateur de force. Ce courant sera délivré par une source de courant programmable. Suite aux essais sur un premier prototype, une version optimisée, intégrée et modulaire a été réalisée. Les caractéristiques intrinsèques de la source en fonctionnement permanent ont été testées. Le bruit propre du dispositif de détection utilisé n'est pas un facteur limitant pour les autres mesures. Les écarts types d'Allan

calculés sur les premières séries de mesures montrent des performances prometteuses pour cette source de courant.

#### 6.4. Résistances étalons de 200 $\Omega$

Une première série d'étalonnage des résistances de référence a été réalisée par comparaison à l'effet Hall quantique. Les incertitudes types associées à ces mesures sont comprises entre  $1,2 \cdot 10^{-9}$  et  $2,5 \cdot 10^{-9}$ . Des premières expériences de dépendance en fonction de la température et du courant ont été réalisées. Les premiers résultats sont très satisfaisants.

### 7. Informatique et acquisition des paramètres d'environnement

Les locaux pour le projet « balance du watt » ont été équipés d'un réseau de capteurs. La température, la pression et l'humidité sont déterminées dans chaque salle ainsi que sur le toit du bâtiment. Le champ magnétique ambiant de la salle blanche est aussi mesuré. Un logiciel spécifique a été développé et mis en œuvre, permettant ainsi d'avoir une vue en temps réel sur tous les paramètres mesurés. Ce logiciel a été construit de manière à pouvoir intégrer en tant que de besoin la mesure de tout autre paramètre de l'expérience.

### 8. Gravimétrie

L'assemblage du dispositif expérimental a été achevé. Le banc optique a été entièrement reconstruit afin de pouvoir disposer aisément de tous les faisceaux lasers nécessaires au fonctionnement du gravimètre. Des premiers signaux ont été obtenus.

L'installation du gravimètre sur la plateforme d'isolation passive a permis d'augmenter le temps

d'interaction jusqu'à 100 ms. La sensibilité est limitée par les vibrations résiduelles au niveau de quelques  $10^{-8} g/Hz^{1/2}$ .

Le laboratoire a accueilli un gravimètre absolu à coin de cube, de type FG5, qui a pu mesurer  $g$  au voisinage immédiat du gravimètre à atomes froids pendant plusieurs jours. Il apparaît que le gravimètre atomique possède une sensibilité assez bonne pour détecter les variations journalières de  $g$ . Un palier a été atteint autour de  $4 \cdot 10^{-9} g$ . Toutefois, des biais ont été constatés et devront faire l'objet d'une étude plus approfondie.

D'autres part, une caractérisation du site de Trappes a débuté : détermination des isogrades, gradients, transfert entre les points de référence, etc.

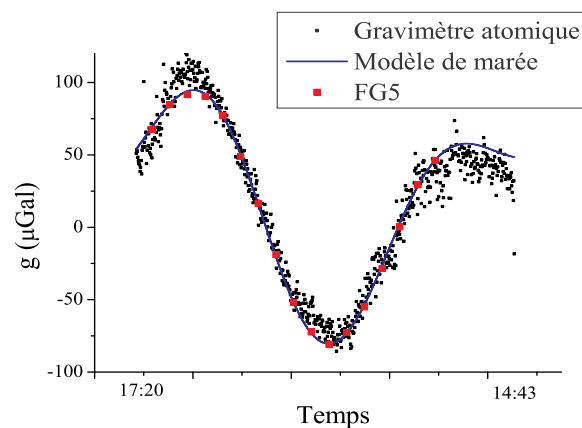


Fig. 3. – Signaux temporels mesurés par le gravimètre atomique (points) et le FG5 (carrés), comparés avec le modèle de marée (trait continu).