

EXPERIENCE FRANCAISE DE LA BALANCE DU WATT : CONCEPTION ET REALISATION DU COMPARETEUR DE FORCES

P. Pinot, G. Genevès*, P. Juncar, M. Lecollinet, S. Macé et F. Villar*

CNAM-INM

292 rue Saint-Martin F-75141 Paris Cedex 03

*LNE

29 Avenue Roger Hennequin, ZA Trappes Elancourt F-78197 Trappes

Résumé

Cet article présente uniquement le comparateur de forces conçu et développé par le CNAM-INM en collaboration avec le LNE qui doit être utilisé dans l'expérience française de balance du watt. On explique le principe de la comparaison de forces effectuée dans cette expérience. La conception de la balance de forces utilisant des lames flexibles en guise de pivots est présentée et les deux premiers prototypes de balance à fléau à lames flexibles sont décrits et quelques résultats sont discutés.

Abstract

This article only presents the force comparator designed and developed by the CNAM-INM in collaboration with the LNE to be used for the French watt balance experiment. The principle of the force comparison in this experiment is explained. The design of the force balance using flexure strips as pivots is presented and the two first prototypes of flexure strip beam balance are described and some results are discussed.

Introduction

Depuis une vingtaine d'années, un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie ont entrepris des recherches visant à raccorder l'unité de masse à une constante physique fondamentale avec une incertitude relative inférieure à 10^{-8} . Ce niveau d'incertitude répond à une exigence de continuité pour les utilisateurs d'étalons de masse. En effet le changement de définition de l'unité de masse ne doit pas induire d'écart significatif sur la valeur des étalons usuels. Ces travaux ont été encouragés par les résolutions successives prises par les CGPM en 1995 et en 1999 incitant les laboratoires nationaux de métrologie à entreprendre des études visant à contrôler la stabilité du prototype international du kilogramme et susceptible de déboucher, à terme, sur une nouvelle définition du kilogramme [1, 2].

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées pour atteindre cet objectif. Les diverses expériences (balances de puissance ou de tension, lévitation magnétique, accumulation d'ions, monocristal de silicium,...) qui sont actuellement proposées présentent des perspectives d'évolution assez inégales. L'expérience de balance de puissance dite de la « balance du watt » est à ce jour la plus prometteuse et a déjà fait l'objet de réalisations expérimentales au NPL (UK) [3, 4], au NIST (US) [5, 6] et au METAS (CH) [7, 8]. De plus, un nouveau projet de balance du watt est actuellement à l'étude au BIPM.

En 1999, le Bureau national de Métrologie, (intégré en 2005 au Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, LNE) s'est engagé dans la réalisation d'une expérience de balance du watt avec une équipe pluridisciplinaire et interlaboratoire [9, 10]. C'est dans le cadre du développement de cette expérience que le CNAM-INM a conçu et développé en collaboration avec le LNE un comparateur de forces basé sur le schéma d'une balance à fléau symétrique utilisant des lames flexibles.

Avant d'examiner les caractéristiques prises en compte dans la conception de cette balance de force, nous rappellerons le principe de l'expérience de balance du watt. Ensuite, nous présenterons le prototype d'essai conçu autour d'un fléau à lames flexibles qui a été réalisé et qui a été testé en comparateur de masses pour valider certains choix technologiques. Enfin, nous décrivons le prototype développé pour fonctionner en comparateur de forces et qui doit être installé sur le démonstrateur de l'expérience française de balance du watt.

Expérience de balance du watt

Principe de la balance du watt

L'expérience de la balance du watt repose sur le principe de puissance virtuelle pour comparer indirectement une puissance mécanique et une puissance électrique. L'idée a été proposée en 1976 par l'anglais B.P. Kibble [11]. L'expérience se déroule en deux phases, l'une dite statique, l'autre dynamique.

Phase statique : Elle reprend le principe de l'électrodynamomètre utilisé autrefois pour la détermination directe de l'ampère. Un conducteur de longueur l parcouru par un courant I est placé dans un champ d'induction B homogène de telle sorte que la force de Laplace F_e s'exerce sur celui-ci soit verticale. Le courant I est ajusté pour que la force sur le conducteur, suspendu à un fléau de balance équilibre le poids P agissant sur le fléau d'une masse m soumise à l'accélération de la pesanteur g . Moyennant des hypothèses d'orthogonalité et de configuration géométrique parfaite, l'équilibre de la balance se traduit par l'équation :

$$P = F_e \quad \text{ou encore} \quad mg = BlI \quad (1)$$

On est capable de comparer une force gravitationnelle (un poids) et une force électromagnétique (force de Laplace) avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-6} au mieux ; l'exactitude de cette comparaison est limitée par la détermination expérimentale du produit Bl . L'idée de

Kibble a été de remédier à cette difficulté en effectuant une mesure complémentaire en phase dynamique.

Phase dynamique : La phase dynamique constitue une détermination indirecte du produit Bl qui peut être reporté dans la relation (1). Elle consiste à déplacer à vitesse constante v , le même conducteur en boucle ouverte dans le même champ magnétique B suivant une trajectoire verticale. L'expérience requiert seulement l'invariance de l'induction B et de la longueur l du conducteur pendant le temps de la mesure. En posant là encore des hypothèses d'orthogonalité et de configuration géométrique parfaite, la force électromotrice induite E aux bornes du conducteur s'écrit :

$$E = vBl \quad (2)$$

Relation entre masse et constante de Planck : En éliminant le produit Bl entre les deux équations (1) et (2), on arrive à :

$$mgv = EI \quad (3)$$

Le premier terme de l'égalité représente une puissance mécanique, le second une puissance électrique. Le courant I est mesuré par la différence de potentiel V qu'il provoque aux bornes d'une résistance R . L'expression (3) peut alors s'écrire :

$$mgv = EV/R \quad (4)$$

Les tensions V et E sont déterminées par comparaison à une tension de Josephson U_f délivrée par un étalon à effet Josephson et la résistance R par comparaison à une résistance R_H d'un étalon quantique de résistance (effet Hall quantique). Ces effets quantiques macroscopiques permettent de rattacher les valeurs de tension et de résistance électriques à la constante de Planck h et à la charge de l'électron e . L'expression de la puissance électrique à partir des constantes de Josephson et de von Klitzing permet d'éliminer e , ne laissant apparaître que la constante de Planck h facteur d'un paramètre A expérimental :

$$mgv = Ah/4 \quad (5)$$

Caractéristiques communes

Les caractéristiques communes aux expériences de balance du watt réalisées ou en cours de réalisation concernent les points suivants :

Expérience sous vide : L'expérience est réalisée sous vide afin d'éliminer la correction d'indice de l'air pour les mesures interférométriques, en particulier de la vitesse de translation verticale lors de la phase dynamique. Pour la phase statique, cela permet également de ne pas avoir à effectuer de correction de poussée de l'air sur la masse de transfert et d'éliminer les effets de convection et de courant d'air sur l'équilibre de la balance.

Point d'application et alignement des forces : Pour la phase statique, la bobine est suspendue à la même extrémité du fléau de la balance que le plateau de pesée qui doit recevoir la masse de transfert m . Cela doit permettre d'appliquer la force électromagnétique F_e et le poids P en un même point à l'extrémité du même bras de

fléau de la balance. Ce principe est similaire à la méthode de Borda pour les comparaisons de masse. De plus, il faut s'assurer que la force électromagnétique F_e soit verticale, pour que l'égalité des moments de force qui équilibre la balance corresponde simplement à l'égalité des forces appliquées. Cela nécessite de régler le centrage et l'horizontalité de la bobine et du circuit magnétique de façon à n'induire aucune composante de force autre que verticale.

Deux équilibres statiques : Le courant qui traverse la bobine plongée dans le champ magnétique de l'aimant (permanent ou supraconducteur) est asservi de manière à maintenir l'équilibre de la balance à sa position de référence. Ce courant doit être aussi faible que possible afin de réduire la puissance dissipée, source d'effets parasites indésirables.

Pour cela, on effectue deux équilibres permettant de diviser par deux l'intensité du courant circulant dans la bobine et donc par quatre la puissance dissipée. La masse de tare est alors ajustée à la moitié de la masse de transfert $m/2$. Le premier équilibre est réalisé sans la masse de transfert et le second avec la masse de transfert sur le plateau de pesée. La figure 1 représente ces deux équilibres où :

- M est la masse de la bobine et de sa suspension ;
- L_1 et L_2 sont les longueurs des bras du fléau ;
- m est la masse de transfert ;
- C est la masse de tare compensant M ;
- F_1 et F_2 sont les forces de Laplace générées par les intensités de courant électrique I_1 et I_2 respectivement qui sont de signe opposé.

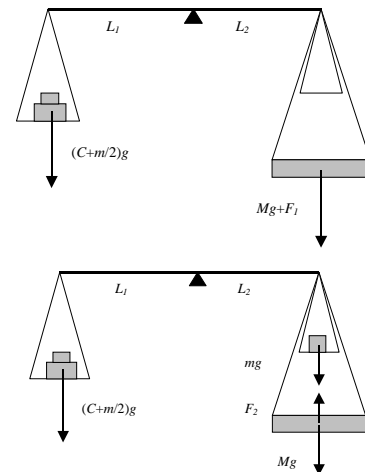


Figure 1 : Représentation schématique des deux équilibres statiques.

La combinaison des deux équations correspondant aux deux équilibres donne, avec les mêmes hypothèses que celles utilisées pour l'expression (1), une relation identique :

$$mg = F_2 - F_1 = Bl(I_2 - I_1) = BIl \quad (6)$$

Ces deux équilibres, outre la diminution de puissance dissipée, offrent l'avantage de réduire l'influence des

forces électromotrices parasites du fait que les courants I_1 et I_2 circulent en sens opposé dans le circuit.

Caractéristiques de l'expérience française

L'expérience française s'est beaucoup inspirée des expériences du NPL, du NIST et du METAS en tenant compte des conseils de nos homologues étrangers et en cherchant à proposer des solutions technologiques innovantes.

Particularités de l'expérience française : elles reposent sur :

- a - la conception et la réalisation d'une balance de force (pour une charge utile de 10 N) à fléau de 10 cm de longueur de bras à lames flexibles (lames de 10 μm d'épaisseur) avec un quadruple cardan permettant de confondre les points d'application des forces électromagnétique et gravitationnelle ;
- b - la conception et la réalisation d'un aimant permanent (SmCo) de forte induction magnétique (1 T) ;
- c - la recherche d'un matériau de très faible susceptibilité magnétique (Au-12%Pt ou Ir) pour la réalisation d'une masse de transfert de 500 g ou 1 kg ;
- d - le choix, pour la phase dynamique, de déplacer verticalement à une vitesse de 2 mm/s l'ensemble bobine et balance de force (soit une masse d'environ 15 kg) ;
- e - la conception et la réalisation d'un dispositif de compensation de charge et de guidage de translation verticale à lames flexibles sur une course maximale de 80 mm pour une course à vitesse constante de 40 mm ;
- f - la conception et la réalisation d'un dispositif pour mesurer la position et la vitesse de la bobine, basé sur un interféromètre de Michelson hétérodyne ;
- g - la conception et la réalisation d'un gravimètre absolu à atomes froids (Rb) basé sur l'interférométrie atomique.

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Induction B | 1 T |
| Ø Bobine D | 260 mm |
| Nombre de tours | 600 |
| Masse m | 500 g |
| Courant I | 5 mA |
| Résistance R | 200 Ω |
| Tension E V | 1V |
| Vitesse v | 2 mm/s |
| Puissance dissipée | 4 mW |
| Course verticale | 40 mm |

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'expérience française de balance du watt.

Le tableau 1 donne les principales caractéristiques de l'expérience française pour une masse de transfert de 500 g, ce choix a été motivé par des critères de dimension de circuit électromagnétique et de limite de courant. Les éléments du circuit électromagnétique sont déterminés de manière à obtenir une tension V de 1 V pour la phase statique et une force électromotrice E de 1 V avec une vitesse de translation v de 2 mm/s pour la phase dynamique (la mesure d'une tension de 1 V à l'aide de

réseau programmable de jonctions Josephson étant particulièrement bien maîtrisée).

L'utilisation d'un aimant permanent oblige à rechercher une puissance dissipée aussi faible que possible donc des courants limités à quelques milliampères, car pour contenir les variations d'induction magnétique dans les limites fixées, la température de l'aimant doit être stabilisée à mieux que le millikelvin.

Conception du comparateur de force

Nous avons choisi de concevoir et réaliser entièrement le comparateur de force pour avoir la maîtrise totale de cet élément central de l'expérience et pour pouvoir l'adapter tant sur le plan purement mécanique que sur celui du contrôle de son fonctionnement (capteurs de position, asservissements de position, commande des moteurs de l'échangeur de masse, séquence opérationnelle,...) au fur et à mesure de l'évolution de l'expérience. Ce comparateur a été conçu autour d'un fléau symétrique ayant une longueur de bras de 10 cm et utilisant des lames flexibles en guise de pivots. Bien que la valeur nominale de la masse de transfert prévue pour l'expérience française soit de 500 g, nous avons dimensionné ce comparateur de force pour une masse de transfert de 1 kg au cas où les résultats obtenus nous encouragent à passer à cette valeur nominale.

Fléau symétrique à lames flexibles

Fléau symétrique : Le choix d'un fléau parfaitement symétrique présente les avantages, entre autres, de simplifier sa conception, de pouvoir régler plus facilement la position de son centre de gravité par rapport à son centre de rotation et de pouvoir ajuster simplement la masse de tare. Le principal inconvénient d'un tel fléau, outre le fait qu'il faille développer une suspension sous lame flexible pour la masse de tare, réside dans la difficulté de prédire théoriquement son comportement dynamique [12 - 14].

Lames flexibles : La théorie de la flexion d'une lame sous charge est maintenant bien connue [15 - 19] et les avantages de l'utilisation de lames flexibles à la place des couteaux/coussinets pour les comparateurs de masse ont été bien étudiés depuis de nombreuses années [14, 20 - 22]. Pour l'expérience, les dimensions des lames d'extrémité du fléau ont été calculées pour tenir une charge de 25 N prenant en compte non seulement la masse de transfert de 1 kg, mais également la masse morte suspendue (lignes de suspension, plateau de pesée, bobine, miroirs,...). Evidemment, la lame centrale doit être dimensionnée pour tenir une charge d'environ 50 N.

Suspensions du plateau de pesée et de la bobine

Quadruple système croisé de Cardan : Pour ramener les points d'application des forces électromagnétique et gravitationnelle en un même point, nous avons conçu une pièce monobloc en alliage de cuivre-béryllium constituant deux double système croisé de Cardan dont les axes de rotation se coupent en un même point. Les pivots de rotation sont des lames flexibles usinées dans la masse de

la pièce par électro-érosion à fil. L'épaisseur des lames est d'environ 50 μm . La figure 2 montre la vue en perspective de cette pièce complexe.

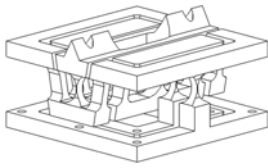


Figure 2 : Vue en perspective du quadruple système croisé de Cardan

Double ligne de suspension : Les découplages statiques et dynamiques des éléments suspendus (c'est à dire du plateau de pesée et de la bobine) sont réalisés pour chacun des deux éléments au moyen d'une ligne de suspension comportant deux sections articulées autour de pivots. C'est une technique largement employée sur les balances et comparateurs de masse pour atténuer les effets d'excentration de masse [22 - 24]. La raideur et le frottement des articulations entre les sections de ligne de suspension ne sont pas nuls, cela conduit en cas de mauvais alignement des forces à un angle de flexion non nul de la lame d'extrémité supportant la ligne de suspension. Il faut rechercher par calcul la longueur relative des sections de suspension permettant de réduire suffisamment l'angle résiduel de la lame d'extrémité. De plus, la longueur totale de la ligne de suspension est limitée par des contraintes de hauteur totale de l'expérience de balance du watt que l'on souhaite la plus petite possible. La figure 3 présente la double ligne de suspension fixée sous le quadruple système croisé de Cardan conçue pour le plateau de pesée et la bobine.

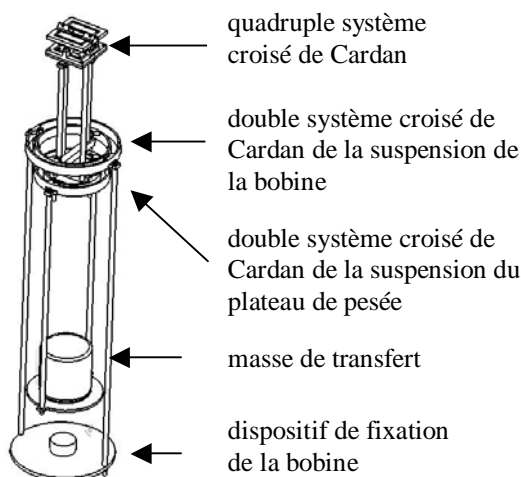


Figure 3 : double ligne de suspension du plateau de pesée et de la bobine.

De plus, divers conducteurs électriques doivent suivre la ligne de suspension, en particulier pour l'alimentation de

la bobine, deux fils d'or doivent descendre du bâti par la lame centrale jusqu'à la bobine de manière à ne pas induire des moments de raideur supplémentaires au niveau des divers pivots et particulièrement des lames flexibles du fléau.

Capteur de position et compensation de force

Un fléau symétrique à lames flexibles pour les meilleurs réglages de centre de gravité et d'autostatisme est particulièrement sensible et ne peut être utilisé sans système d'asservissement. De plus, la flexion et la charge des lames flexibles doivent être contrôlées pour ne pas dépasser leurs limites d'élasticité et pour réduire les effets d'hystérésis.

Compensation de force : Le fléau à lames flexibles doit être maintenu à sa position de référence (position horizontale) lors des deux équilibres statiques de l'expérience en asservissant l'intensité et le sens du courant circulant dans la bobine permettant d'ajuster la force de Laplace par un système de boucle d'asservissement PID (électronique ou logiciel) sur le signal d'erreur d'un capteur optique de position issu d'un amplificateur à détection synchrone.

Charge constante : En dehors des phases d'équilibre statique de l'expérience, le fléau doit être également maintenu dans sa position de référence au moyen de butées asservies sur le signal d'erreur du capteur de position. Ces butées appliquent une force de contact de compensation sous les lames flexibles du fléau de manière que la lame centrale et les deux lames d'extrémité du fléau soient maintenues sous la même charge que lors des équilibres statiques.

Réalisation du comparateur de force

Prototype fonctionnant en comparateur de masse

Montage d'essai : Afin de tester deux types de lames flexibles (feuilles en acier inoxydable de 10 μm d'épaisseur et lames usinées par le BIPM en alliage de cuivre-béryllium de 60 μm d'épaisseur) ainsi qu'un premier dispositif d'asservissement, nous avons conçu et réalisé un fléau en alliage d'aluminium d'une longueur de bras de 10 cm représenté sur la figure 4. Pour ces essais, un montage en comparateur de masse était suffisant. Un plateau de pesée avec sa suspension articulée est fixé à chacune des extrémités du fléau. La charge sur chaque plateau est réalisée par une masse de 1 kg. L'échangeur de masse est un simple piston motorisé non asservi qui permet de soulever la masse du plateau ou de la poser sur le plateau. Enfin une butée motorisée non asservie permet de maintenir le fléau dans sa position de référence, lorsque l'on retire la masse du plateau lors des essais de répétabilité.

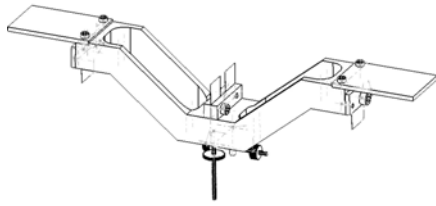


Figure 4 : schéma du fléau d'essai en alliage d'aluminium représenté ici avec des lames flexibles pincées et les vis de réglage du centre de gravité.

Capteur de position et compensation de force : Le capteur de position est constitué d'une diode laser solidaire du bâti de la balance et dont le faisceau modulé en amplitude se réfléchit sur un miroir collé à l'une des extrémités du fléau. Le faisceau réfléchi est capté par une photodiode à deux cadrans fixée au bâti. Le signal de la photodiode est traité par un amplificateur à détection synchrone. Le signal d'erreur correspondant à l'écart entre le signal traité et la valeur de consigne est utilisé dans une boucle d'asservissement PID électronique qui engendre un courant dans la bobine d'un moteur électromagnétique. Ce moteur se compose d'une bobine horizontale fixée au bâti de la balance par l'intermédiaire d'une table XYZ. Un système magnétique, fixé à l'une des extrémités du fléau, plonge dans la bobine. Il est constitué de deux petits aimants permanents cylindriques dont les axes verticaux de révolution sont confondus et dont deux pôles magnétiques identiques sont maintenus face à face dans un étui en aluminium. Ce dispositif bobine et aimant permet d'appliquer une force de compensation verticale à l'extrémité du fléau pour le maintenir dans sa position de référence.

Premiers résultats : La sensibilité angulaire théorique, pour la configuration optimale en termes d'autostatisme et de position du centre de gravité, est de 4 mrad/mg pour les lames en acier inoxydable et de 0,3 mrad/mg pour les lames en cuivre-béryllium (soit un rapport de 13). La sensibilité angulaire optimale ne peut pas être déterminée expérimentalement car le fléau est trop instable. Cette instabilité est essentiellement due à une grande sensibilité au moindre courant d'air, aux effets de collage sur les pointes de butée et surtout aux contraintes mécaniques existant dans les lames. Ce dernier point est prépondérant pour les lames pincées en acier inoxydable où l'origine des contraintes provient à la fois du laminage directionnel de la feuille et de l'inhomogénéité du pincement des lames le long des mors de fixation.

En mode asservi, on a obtenu une sensibilité électrique expérimentale de 50 mV/mg pour le montage avec des lames en acier inoxydable et de 7 mV/mg pour le montage avec des lames en alliage de cuivre-béryllium. Cela correspond à un rapport de valeurs expérimentales de 7 conforme au calcul théorique compte tenu des défauts liés à la réalisation pratique. La répétabilité relative en termes de comparaison de masses est de l'ordre de 10^{-8} obtenue en mode asservi, avec les lames en acier inoxydable de 10 μ m d'épaisseur dans des conditions environnementales non maîtrisées en termes de température et de vibration.

Pour la réalisation du comparateur de force, ces résultats nous ont encouragé à utiliser une feuille laminée comme lame flexible malgré la difficulté liée à la technique de fixation par pincement entre mors.

Prototype fonctionnant en comparateur de force

Pour la réalisation du prototype de comparateur de force, nous avons choisi d'utiliser des feuilles laminées de 10 μ m en Havar, superalliage à base de cobalt. Ce choix a été guidé par les caractéristiques mécaniques de cet alliage et par des contraintes de laminage plus faibles que sur les feuilles d'acier inoxydable. La caractérisation métrologique de ce prototype est en cours.

Fléau : Le fléau en alliage d'aluminium d'une longueur de bras de 10 cm, d'une masse de l'ordre de 200 g a été conçu de manière à présenter une meilleure rigidité que le fléau d'essai et à permettre le changement d'une lame flexible sans nécessiter le démontage complet des autres lames comme sur le premier fléau d'essai. La figure 5 présente ce nouveau fléau.

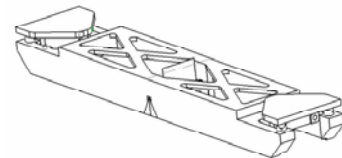


Figure 5 : fléau du prototype de comparateur de force représenté avec les systèmes amovibles de fixation des lames flexibles

Lignes de suspension : Pour symétriser aussi parfaitement que possible la balance, la même double ligne de suspension de la figure 3 est fixée à chaque extrémité du fléau. La seule différence est que d'un côté la bobine est fixée à sa suspension et de l'autre une masse de tare compensant la masse de la bobine est placée en lieu et place de la bobine.

Capteur de position : Un nouveau capteur de position a été développé. Il est constitué d'une diode laser fibrée dont le faisceau émis traverse une lentille convergente qui est montée à l'une des extrémités du fléau. Une photodiode fixée au bâti et munie d'un diaphragme modulé spatialement par une cale piézo-électrique reçoit une partie de la lumière modulée transmise par la lentille à travers le diaphragme. Le signal de la photodiode est ensuite utilisé comme dans le dispositif décrit précédemment.

Conclusions

A partir d'un premier montage expérimental d'un fléau fonctionnant en comparateur de masse, les résultats de détermination de la sensibilité, de la période d'oscillation libre et de la répétabilité pour une charge de 10 N suspendue à chaque extrémité du fléau sont conformes aux prévisions théoriques. Cela a permis de valider la technique délicate de la feuille métallique pincée utilisée comme pivot. Ce montage a également permis de valider un premier système de boucle d'asservissement PID électronique avec un type de capteur optique de position

simple et ayant une résolution suffisante pour l'application.

Les études préliminaires menées sur le premier montage expérimental nous ont conduit au développement d'un prototype de comparateur de force adapté à l'expérience française de balance du watt. Ce nouveau dispositif est en cours de qualification.

L'intégration de ce fléau sur le démonstrateur de l'expérience nécessitera de concevoir et de réaliser divers dispositifs optiques, mécaniques et électriques pour le contrôle en position du fléau, des plateaux et de la bobine et pour l'échange de masse.

Références

- [1] R. Davis, "The SI unit of mass", *Metrologia*, Vol. 40, pp 299-305, 2003.
- [2] T. J. Quinn, Status of the kilogram", *IEEE Trans.Instrum. Meas.* **40** (1991) pp 81-85
- [3] B. P. Kibble, I. A. Robinson and J. H. Belliss, "A realization of the SI watt by the NPL moving-coil balance", *Metrologia* **27** (1990) pp 173-192.
- [4] I. A. Robinson and B. Kibble, "The NPL moving-coil apparatus for measuring Planck's constant and monitoring the kilogram", *IEEE Trans. Instrum. Meas.***46** (1997) pp 596-600.
- [5] P. T. Olsen, R. E. Elmquist, W. D. Phillips, E. D. Williams, G. R. Jones and V. E. Bower, "A measurement of the NBS electrical watt in SI units", *IEEE Trans. Instrum. Meas.***38** (1989) pp 238-244.
- [6] R. L. Steiner, A. D. Gillepsie, K. Fujii, E. R. Williams, D. B. Newell, A. Picard, G. N. Stenbakken and T. Olsen, "The NIST watt balance: Progress toward monitoring the kilogram", *IEEE Trans. Instrum. Meas.***46** (1997) pp 601-604.
- [7] W. Beer, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, A. Courteville, Y. Salvadé and R. Dändliker, "A Proposal for a New Moving-Coil Experiment", *IEEE Trans. Instrum. Meas.***48** (1999) pp 192-195.
- [8] A. Eichenberger, B. Jeckelmann, P. Richard, „Tracing Planck's constant to the kilogram by electromechanical methods“, *Metrologia* **40** (2003), 356-365.
- [9] M. Lecollinet, Ch. Bordé, M. Chambon, A. Clairon, T. Coorevits, N. Feltrin, G. Genevès, A. Gosset, P. Juncar, P. Pinot, F. Platel, « Vers une balance du watt française », *Métrie* 2001, 22-25 octobre 2001, St Louis, France.
- [10] F. Alves, M. Besbes, A. Clairon, L. Chassagne, J. David, A. Gosset, P. Gournay, D. Holleville, P. Juncar, A. Landragin, M. Lecollinet, F. Pereira Dos Santos, P. Pinot, S. Topçu, F. Villar, G. Genevès, « La balance du watt du BNM : état d'avancement », *Métrie* 2003, Toulon, France.
- [11] B. P. Kibble, "A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method", *Atomic Masses and Fundamental constants* **5**, ed. J.H. Sanders and A.H. Wapstra, New-York Plenum (1976) pp 545-551.
- [12] M. E. Cage and R. S. Davis, "An Analysis of Read-Out Perturbations Seen on an Analytical Balance with a Swinging Pan", *Journal of Research of the NBS* **87** (1982) pp 23-45.
- [13] A. J. F. Metherell and C. C. Speake, "The Dynamics of the Double-Pan Beam Balance", *Metrologia* **19** (1983) pp 109-122.
- [14] C. C. Speake, "Fundamental limits to mass comparison by means of a beam balance", *Proc. R. Soc. Lond. A* **414** (1987) 333-358.
- [15] F. S. Eastman, "The Design of Flexure Pivots", *J. Aeronautical Science* **5** (1937) pp 16-21.
- [16] W. H. Wittrick, "The Theory of Symmetrical Crossed Flexure Pivots", *Aust. J. Sci. Res. A* **1** (1948) pp 121-134.
- [17] W. H. Wittrick, "The Properties of Crossed Flexure Pivots, and the Influence of the Point at which the Strips Cross", *Aeronautical Quarterly* **11** (1951) pp 272-292.
- [18] W. D. Weinstein, "Flexure-Pivot Bearings", *Machine Design* **37** (1965) pp 136-145.
- [19] P. H. Sydenham, "Elastic design of fine mechanism in instruments", *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **17** (1984) pp 922-930.
- [20] T. J. Quinn, C. C. Speake and R. S. Davis, "A 1 kg Mass Comparator Using Flexure-Strip Suspensions: Preliminary Results", *Metrologia* **23** (1986/87) pp 87-100.
- [21] T. J. Quinn, "The beam balance as an instrument for very precise weighing", *Meas. Sci. Technol.* **3** (1992) 141-159.
- [22] A. Picard, "The BIPM flexure-strip balance FB-2", *Metrologia* **41** (2004) pp 319-329
- [23] H. A. Bowman and L. B. Macurdy, "Gimbal device to minimize the effects of off centre loading on balance pan", *J. Res. NBS* **64 C** (1960) 277-9.
- [24] H. A. Bowman and H. E. Almer, "Minimization of the arrestment error in one-pan, two-knife balance systems", *J. Res. NBS* **67 C** (1963) 227-35.