

LA BALANCE DU WATT DU BNM : ETAT D'AVANCEMENT

F.Alves⁷, M. Besbes⁶, A. Clairon⁴, L. Chassigne⁸, J. David⁵, A. Gosset², P. Gournay¹, D. Holleville⁴, P. Juncar³, A. Landragin⁴, M. Lecollinet³, F.Pereira Dos Santos⁴, P. Pinot³, S. Topçu⁸, F. Villar³, G. Genevès¹

1 BNM-LNE/LAMA, 33, avenue du général Leclerc, 92260 Fontenay aux Roses

2 BNM-LNE, 1 rue Gaston Boissier, 75015 Paris

3 BNM-INM/Cnam, 292 rue Saint Martin, 75003 Paris

4 BNM-SYRTE, Observatoire de Paris, 61, avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

5 ENSAM, 8, boulevard Louis XIV, 59046 Lille cedex

6 LGEP, Ecole Supérieure d'Electricité, Plateau du Moulon, 91192 Gif sur Yvette Cedex

7 SATIE, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 61 av du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex

8 LIRIS, UVSQ, 45 avenue des Etats-Unis, 78035 Versailles Cedex

Résumé

Une expérience de type « balance du watt », basée sur la comparaison de puissances électriques et mécaniques est en cours d'élaboration. En raison de sa nature pluridisciplinaire, elle requiert la participation de plusieurs laboratoires du BNM et de laboratoires extérieurs.

Le projet a pour but de caractériser le comportement en fonction du temps du kilogramme en le reliant à une grandeur invariante -la constante de Planck- qui pourrait à terme servir de base à l'élaboration d'une nouvelle définition de l'unité de masse.

Le principe de l'expérience, les options retenues pour le dispositif de mesure et ses principales composantes en cours de développement sont décrits.

Abstract

A « watt balance » type project, based on a comparison between electrical and mechanical powers is developed. Due to its interdisciplinarity, it requires the participation of several BNM and external laboratories.

The purpose of the project is to characterise the time dependence of the kilogram by linking it to an invariant quantity –the Planck's constant- that could be used as a basis for the elaboration of a new definition of the mass unit in the future.

The principle of the experiment, the selected options for the measurement device and its main components under development are described.

Introduction

Le kilogramme est actuellement la seule unité de base du système international définie par un artefact matériel unique: le prototype international, conservé par le BIPM.

La contamination de la surface de cet étalon par le milieu environnant et l'usure liée à son utilisation et aux nettoyages-lavages nécessaires à son utilisation induisent une variation de sa masse au fil du temps.

Ce phénomène est mis en évidence par la divergence des valeurs obtenues lors des comparaisons périodiques d'un ensemble de copies et prototypes nationaux au prototype international. Depuis la première comparaison, effectuée à la fin du 19^{ème} siècle, une dispersion relative de l'ordre de 1×10^{-7} est observée alors que la dérive moyenne entre le prototype international et ses témoins est de l'ordre de 3×10^{-8} [1].

Cette dérive différentielle ne permet cependant pas d'avoir une idée de l'évolution absolue du kilogramme, montrant ainsi la faiblesse de la définition, dont dépendent, au travers de la définition de l'ampère, celle des autres grandeurs électriques, mais aussi les valeurs de certaines constantes fondamentales de la physique comme le quantum de flux ou la constante de Planck.

L'effet Josephson ou l'effet hall quantique (EHQ), utilisés par la quasi totalité des laboratoires nationaux de métrologie pour matérialiser des références de tension et de résistance, font intervenir de telles constantes.

La tension générée par une jonction Josephson est proportionnelle à sa fréquence d'irradiation et à la constante de Josephson K_J (estimateur du rapport $h/2e$, où e est la charge de l'électron), à laquelle est attribuée, pour les opérations de conservation, une valeur conventionnelle, K_{J-90} entachée d'une incertitude relative égale à 4×10^{-7} , lorsqu'elle est exprimée en unités du système international.

De façon similaire, les valeurs de résistances issues de l'EHQ s'expriment en fonction de R_K (estimateur de h/e^2), dont la valeur conventionnelle R_{K-90} est entachée d'une incertitude relative égale à 1×10^{-7} .

La caractérisation de la stabilité de l'étalon de masse ne pourra être effectuée que par comparaison à des grandeurs invariantes en fonction du temps, comme par exemple la constante de Planck, intervenant dans les phénomènes mentionnés ci-dessus.

Les expériences du type «balance du watt», qui semblent la voie la plus prometteuse à l'heure actuelle pour réaliser une telle comparaison, exploitent l'équivalence des puissances mécaniques et électriques.

Trois dispositifs ont été construits sur ce principe [2] au NPL [3], au NIST [4] et au METAS [5].

L'expérience en cours de réalisation au BNM a pour ambition de contribuer à l'effort international accompli en vue d'établir une nouvelle définition de l'unité de masse.

Le présent article décrit les grandes lignes du dispositif expérimental en développement et détaille les principales options retenues.

Principe

La comparaison de puissance résulte d'une mesure effectuée en deux phases dont la première (phase statique)

s'apparente à la détermination directe de l'ampère, effectuée antérieurement avec les électrodynamomètres fabriqués par de nombreux Laboratoires Nationaux de Métrologie.

Mesures en phase statique

Un conducteur de longueur l parcouru par un courant I est placé dans un champ d'induction B de telle sorte que la force de Laplace F_z s'exerçant sur celui-ci soit verticale. La force sur le conducteur, suspendu à un comparateur de masses, est compensée par l'effet d'une masse m soumise à l'accélération de la pesanteur g :

$$F = mg = BIl \quad (1)$$

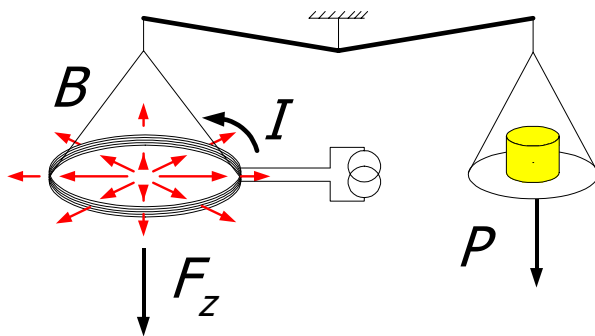


Figure 1 : mesure en phase statique.

Mesures en phase dynamique

La deuxième étape est une phase dynamique au cours de laquelle le même conducteur est déplacé dans le même champ d'induction avec une vitesse verticale v .

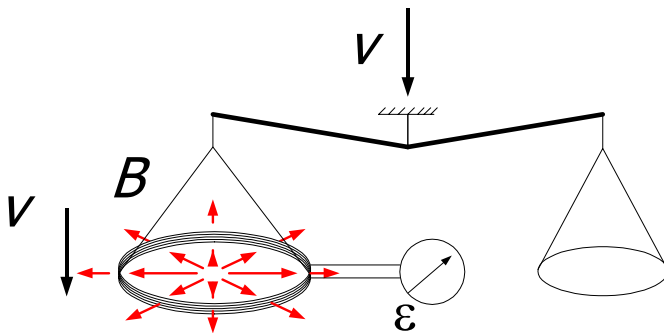


Figure 2 : mesure en phase dynamique.

La tension induite ε qui apparaît alors aux bornes de la bobine est égale à :

$$\varepsilon = Bl \frac{dz}{dt} = Blv \quad (2)$$

La phase dynamique constitue une détermination indirecte du produit Bl qui peut être reporté dans la relation 1.

L'expérience requiert seulement l'invariance de l'induction B et de la longueur l du conducteur pendant le temps de la mesure.

$$mgv = \varepsilon I \quad (3)$$

Le premier terme de l'égalité représente une puissance mécanique, le second une puissance électrique.

Le courant I , mesuré par la différence de potentiel V qu'il provoque aux bornes d'une résistance R et la tension ε peuvent être déterminés par comparaison à un étalon de tension à effet Josephson et à un étalon quantique de résistance (effet Hall quantique).

$$mgv = \frac{A}{K_J^2 R_K} \quad A = \frac{f_1 f_2 h}{k} \quad (4)$$

Cette expression conduit à une relation entre la constante de Planck et la masse :

$$m = h \frac{A}{4gv} \quad (5)$$

qu'il est possible d'établir à partir de mesures de fréquence (f_1 et f_2), de rapport de résistance (k), d'accélération de la pesanteur et de vitesse.

La connaissance de la masse permet de déterminer la constante de Planck. Inversement, l'invariance de la constante de Planck constitue une référence à partir de laquelle la stabilité de l'étalon de masse peut être vérifiée à tout moment.

Caractéristiques principales du dispositif expérimental

Le choix de la structure du dispositif expérimental et de ses dimensions a été dicté par trois principes directeurs [6] :

- les grandeurs doivent être mesurées au mieux des possibilités actuelles,
- le rapport masse étalon/masse morte de la balance doit être aussi élevé que possible,
- le dispositif doit permettre de minimiser l'influence des bruits de toutes origines.

Les éléments et configurations répondant à ces critères sont actuellement tous en cours d'étude ou de fabrication. Ils conduiront à la réalisation d'un démonstrateur dont l'usage permettra de valider les options retenues et dont les différents éléments sont décrits ci-dessous.

Une masse étalon de 500 g est déposée sur le plateau d'un comparateur de masse à fléau à suspensions flexibles symétrique, spécifique à l'expérience, dont la sensibilité peut être adaptée en fonction de la masse totale suspendue. L'alliage AuPt prévu pour la masse étalon en raison de sa faible susceptibilité magnétique fait par ailleurs l'objet d'études en vue de sa caractérisation complète [7].

Son poids est équilibré par la force de Laplace s'exerçant sur une bobine de 270 mm de diamètre suspendue au même bras du comparateur, son bras opposé supportant une tare.

Durant l'expérience, la bobine et le comparateur de masse resteront solidaires et seront déplacés simultanément pendant la phase dynamique. Le déplacement est restreint à un seul degré de liberté par un système comportant un jeu de six ensembles de lames flexibles.

La bobine se situe dans l'entrefer annulaire d'un circuit magnétique passif à symétrie axiale. Ses dimensions et les matériaux utilisés laissant espérer une induction radiale de l'ordre de 1 T. Cette valeur permet de limiter le nombre de tours de la bobine à 580, réduisant en conséquence la masse totale suspendue à la balance.

La résistance totale de la bobine sera de ce fait de l'ordre de 170 Ω . Cette valeur, associée à un courant d'équilibre égal à 5 mA (soit 2,9 A.tours) conduit à une puissance dissipée très faible (4,25 mW), réduisant les effets thermiques dans le circuit magnétique.

Pendant la phase statique, le courant traversant la bobine sera asservi pour maintenir horizontal le fléau de la balance. Sa valeur est déterminée par la chute de tension de 1 V qu'il produit aux bornes de deux résistances de 100 Ω connectées en série et périodiquement comparées à une résistance de Hall quantique. Au cours de la phase dynamique, la bobine est déplacée verticalement à une vitesse de 2 mm/s, la tension induite à ses bornes étant à nouveau de l'ordre de 1 V.

Dans les deux cas - phase dynamique et phase statique - la tension est mesurée par comparaison à une tension de référence délivrée par un réseau de jonctions Josephson programmable.

Le dispositif de mesure est complété par un interféromètre hétérodyne doté d'une référence de phase numérique par comparaison à laquelle il délivre des signaux de contre réaction utilisés pour asservir la vitesse de la bobine. La fréquence du laser de l'interféromètre est étalonnée par rapport à une fréquence de référence recommandée par le CIPM. La référence de phase étant pilotée par une fréquence étalon extérieure. L'incertitude relative sur la vitesse reste de l'ordre de 1×10^{-9} [8].

L'accélération de la pesanteur est mesurée en un point de référence du laboratoire par un gravimètre absolu. Sur la base de l'expérience acquise par l'un des laboratoires du BNM en matière de fontaines atomiques et de senseurs inertiels à atomes froids, il a été décidé de développer un gravimètre à interférométrie atomique utilisant des atomes de Rubidium. Il possède, sur les gravimètres balistiques, l'avantage d'un taux de répétition élevé et de la possibilité d'effectuer des mesures à long terme sans interruption dues à la maintenance mécanique du dispositif [9].

Le transfert de la valeur de l'accélération de la pesanteur au centre de gravité de la masse étalon résulte d'une double démarche : utilisation d'un gravimètre relatif et modélisation de l'effet des masses environnantes.

Enfin, et compte tenu de la sensibilité de l'expérience aux conditions d'environnement, un ensemble de salles est spécialement construit pour l'expérience.

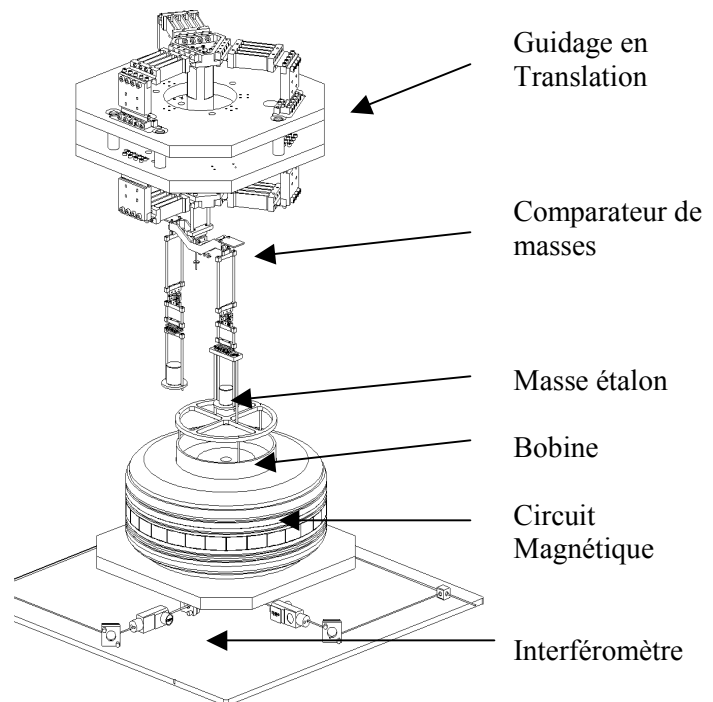


Figure 3 : structure du démonstrateur.

Dans la suite, l'accent sera mis sur trois points particuliers du dispositif : la fonction guidage en translation, le circuit magnétique et les locaux. Pour les autres points clés (masse, interférométrie et gravimétrie), le lecteur pourra se reporter aux références mentionnées en bibliographie.

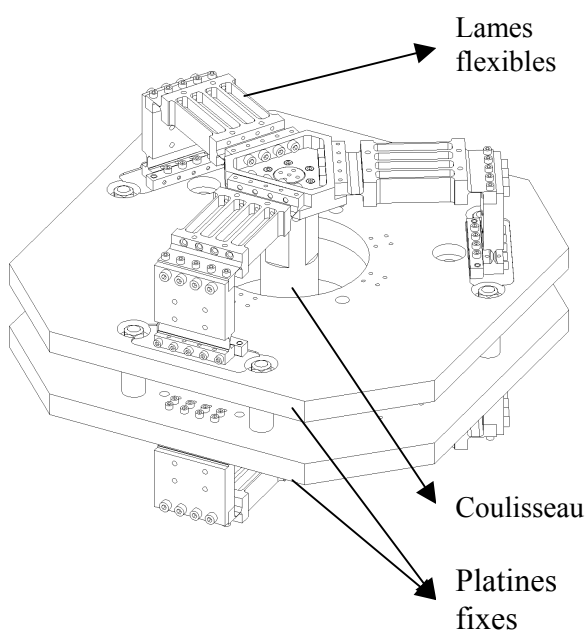
Dispositif de guidage en translation

Le système de translation de l'expérience doit assurer le déplacement vertical de la bobine dans l'entrefer du circuit magnétique sur une course de 70 mm environ.

La réduction de la composante de la tension induite liée au déplacement horizontal de la bobine résulte d'une procédure d'alignement rigoureuse: le plan électrique de la bobine et les composantes radiales du champ délivré par le circuit magnétique doivent être ajustés dans un plan horizontal et la bobine doit en phase dynamique se déplacer selon un axe ne s'écartant pas de la verticale de plus d'une dizaine de secondes d'arc. La rectitude attendue pour ce déplacement sera de l'ordre de 1 à 2 μm .

Figure 4 : dispositif de guidage en translation.

Les travaux en cours [10] dans le cadre du projet de table nanométrique du BNM-LNE ont permis le développement d'une table de translation par éléments flexibles. Les premiers résultats obtenus laissent penser que la qualité de guidage souhaitée pour la balance du watt peut être obtenue par cette technologie.



En comparaison des guidages classiques (éléments roulants par exemple), ils permettent de s'affranchir des problèmes de frottement d'usure et de lubrification.

Un prototype du système de guidage qui sera intégré au démonstrateur est en cours de réalisation. Il est composé de deux étages d'éléments flexibles en alliage d'aluminium, chaque étage comportant lui-même trois lames verticales et trois lames horizontales orientées à 120° les unes des autres.

La flexion des lames au niveau des amincissements permet le mouvement de translation verticale du coulisseau central. L'épaisseur des amincissements est de 0,6 mm pour les éléments horizontaux et 0,8 mm pour les éléments verticaux.

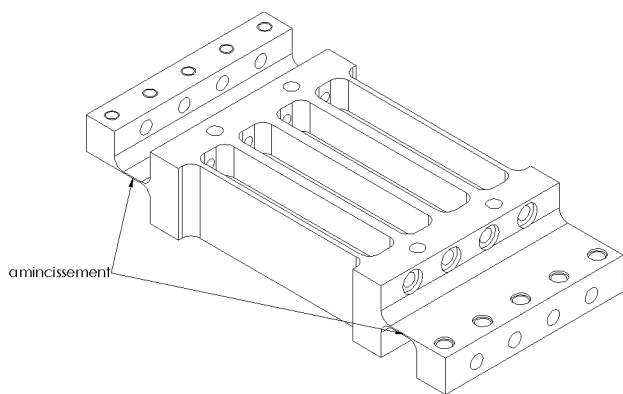


Figure 5 : élément flexible horizontal.

Le prototype a été conçu pour une course de 40 mm, soit +/- 20 mm autour de la position représentée sur la figure 4.

La disposition des éléments à 120° sur 2 étages permet de bloquer tous les degrés de liberté de la partie mobile hormis la translation verticale. On obtient un système hyperstatique offrant cependant l'avantage de conserver l'intégrité du système en cas de défaillance d'un des éléments flexibles.

La qualité de la réalisation mécanique et du positionnement des 2 étages l'un par rapport à l'autre est donc primordiale pour éviter des efforts mécaniques trop importants dans les éléments flexibles.

La rigidité en flexion des lames conditionne le choix de l'actionneur qui permettra la mise en mouvement. Une compensation statique de la charge supportée par les lames sera mise en œuvre pour minimiser la puissance dégagée par l'actionneur. Pour la même raison, la raideur des lames sera minimisée.

Circuit magnétique

Pour la génération de l'induction, la solution d'un circuit magnétique à aimant permanent a été préférée à celle d'un aimant supraconducteur. Aux avantages de ce dernier (stabilité en fonction de la température, possibilité d'inverser la direction du champ), il faut opposer un certain nombre d'inconvénients liés à l'utilisation de la cryogénie au voisinage d'un comparateur de masses, aux possibles difficultés d'alignement et à la faible valeur de l'induction obtenue.

L'obtention d'une force de Laplace verticale sur une bobine circulaire horizontale suppose une induction radiale, dans le plan horizontal, d'une valeur aussi élevée que possible. L'entrefer doit de plus avoir une dimension suffisante pour accueillir la bobine mobile et permettre son déplacement vertical.

L'objectif est d'obtenir une induction proche de 1 T dans un entrefer dont le diamètre moyen est égal à 270 mm, l'épaisseur à 9 mm et la hauteur à 85 mm. De plus, les composantes verticales du champ ne doivent pas excéder $1 \times 10^{-4} T$. Ces composantes, associées à un défaut d'alignement de la bobine et du dispositif de guidage en translation conduisent en phase statique à ce que la force de Laplace ne soit pas colinéaire avec l'accélération de la pesanteur, et en phase dynamique, à ce que la tension induite aux bornes de la bobine comporte une composante liée à son déplacement horizontal.

Enfin, la décroissance du champ en fonction du rayon doit suivre une loi en $1/r$ à mieux que $1 \times 10^{-4} T$. Cette dernière exigence permet de minimiser les erreurs dues au centrage de la bobine dans l'entrefer et à ses variations de diamètre avec la température.

Le circuit magnétique a été modélisé par la méthode des éléments finis.

La structure résultante comportera deux pôles en fer pur ARMCO associés à un noyau en fer cobalt (Imphy AFK 502) dont l'induction à saturation atteint 2,38 T. Ce noyau est percé en son centre en raison de la présence de l'interféromètre destiné aux mesures de position et de vitesse.

L'aimant est constitué par un ensemble de 60 aimants élémentaires en Samarium Cobalt (Sm_2Co_{17}) magnétisés individuellement. Bien que disposant d'un champ rémanent inférieur à celui des aimants en NdFeB, ce matériau a été choisi en raison de son coefficient de température ($3 \times 10^{-4} / ^\circ C$ au lieu de $1 \times 10^{-3} / ^\circ C$).

La rigidité mécanique de la couronne d'aimants sera assurée, lors de la construction, par collage des éléments individuels en sandwich entre deux couronnes d'acier XC48.

Le circuit magnétique est représenté en figure 6.

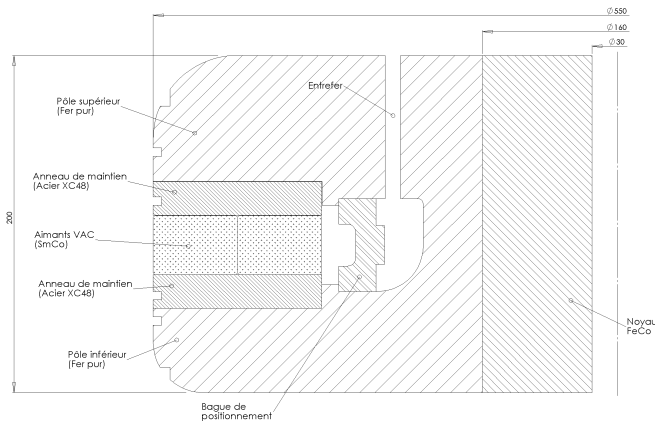


Figure 6: circuit magnétique (vue en coupe).

Les faces de l'entrefer étant parallèles, le calcul montre que le champ décroît avec l'altitude de plus de 1×10^{-3} T dans la zone de déplacement de la bobine. Cet effet est compensé en réduisant la largeur de l'entrefer dans sa partie haute. Dans cette région, un rétrécissement de $16 \mu\text{m}$ permet d'accroître localement la valeur de l'induction dont la variation reste de l'ordre de 1×10^{-4} T sur une distance de 60 mm. Avec cette géométrie, l'induction présentera à mi-hauteur de l'entrefer un minimum où sera placée la bobine pendant la phase statique.

La distribution du champ dépendant fortement de la qualité de la réalisation mécanique du circuit magnétique, l'assemblage doit être effectué avec une précision micrométrique qu'il est impossible d'obtenir si le pôle extérieur repose directement sur la couronne d'aimants dont le matériau interdit un usinage de précision.

Pour cette raison, il est prévu d'inclure dans le montage un calibre constitué par une bague en matériau non magnétique (aluminium) définissant la position relative des deux pôles (Fig. 6). Pour que ce montage soit possible, un espace d'une centaine de μm doit être laissé entre la face supérieure de la couronne d'aimants et la face inférieure du pôle extérieur.

La modélisation montre que des forces de l'ordre de 30 kN s'exercent entre l'aimant et les pôles. Elles induisent, par rotation autour du calibre, une déformation du pôle externe de quelques μm qui doit être prise en compte lors de son dimensionnement.

Pour maîtriser les forces mises en jeu, un dispositif de montage spécifique destiné à assurer la coaxialité des différentes parties mécaniques pendant l'assemblage a été conçu. Il sera constitué de deux couronnes auxquelles seront fixées d'une part le pôle intérieur et d'autre part, successivement, l'aimant et le pôle extérieur.

Le mouvement de descente de l'aimant puis du pôle extérieur sur le pôle inférieur, guidé par six colonnes parallèles, est assuré par trois tiges filetées dont la rotation est synchronisée.

Locaux

Compte tenu de la sensibilité attendue du dispositif de mesure aux paramètres d'environnement, la contribution de la qualité des laboratoires au bon fonctionnement de l'expérience est prépondérante.

Le LNE construit actuellement de nouveaux locaux dédiés à la métrologie sur son site de Trappes. Le bâtiment est destiné à accueillir son service de métrologie électrique ainsi qu'un dispositif de nanométrie dimensionnelle.

Un groupe de salles y sera réservé à la balance du watt. Il comprendra : une salle blanche pour la balance proprement dite, une salle instrumentation, une salle gravimétrie et un atelier.

Si diverses précautions ont été prises pour ce qui concerne la propreté (salle blanche classe 1000), la température ($20^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$), l'humidité relative ($50\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$) et l'environnement électromagnétique (blindages en cuivre plein), c'est sur l'aspect vibratoire qu'il convient de mettre l'accent.

L'influence des bruits anthropiques est minimisée par de nombreuses précautions : choix de l'emplacement du laboratoire sur le site, couloirs et zones techniques suspendus sur amortisseurs, salles d'expérience possédant des dalles indépendantes, absence d'ascenseurs ...

Les dalles des salles « balance du watt » et « gravimétrie » doivent respecter les critères permettant de transférer la valeur de l'accélération de la pesanteur à l'emplacement de la masse étalon et de conserver l'alignement de la balance. En fonction du temps, il est souhaité que leurs variations d'altitude et d'inclinaison restent respectivement inférieures à 1 mm et 10 sec arc.

En raison de la nature des sols, constitués en surface de meulière et d'argiles à meulière, chacune des dalles, dont la dimension (6m x 5,5m x 2m) a été choisie en fonction des fréquences propres souhaitées, est supportée par quatre piliers ancrés dans des couches plus stables situées à 12 m de profondeur.

Figure 7 : Vue en coupe des salles balance du watt et instrumentation.

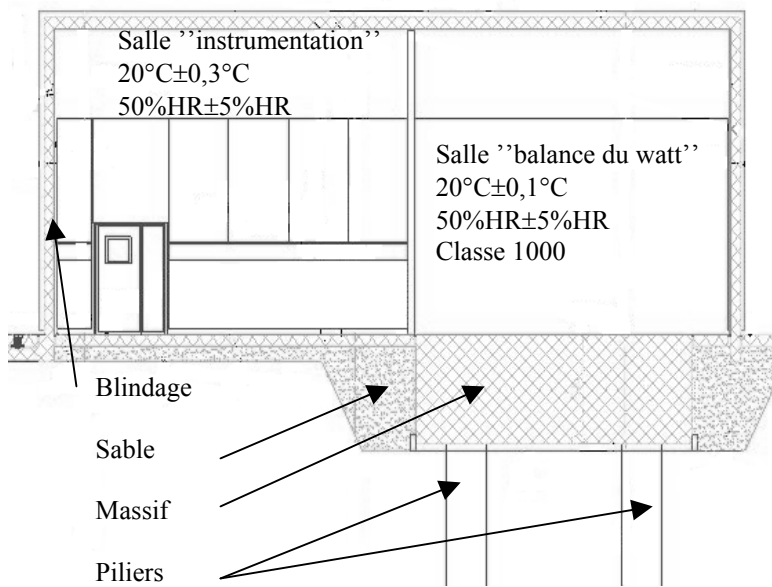
Conclusion

Les composantes de l'expérience décrites ci-dessus doivent contribuer à disposer d'un montage exploitable pour des premières mesures dans le courant de l'année 2006.

L'incertitude relative espérée à terme sur la valeur de la constante de Planck est de l'ordre de 1×10^{-8} .

L'accord des résultats obtenus par les Laboratoires Nationaux de Métrologie disposant de balances du watt ou d'expériences complémentaires pourrait alors conduire à un consensus international sur l'opportunité de changer la définition du kilogramme.

L'évolution de la définition de l'unité de masse pourrait être similaire à celle dont a été objet le mètre, défini en 1983 à partir de la vitesse de propagation de la lumière dans le vide.



[10] S. Ducourtieux, S. Duhem, L. Lahousse, F. Larsonnier, J.M. David, G. Vaillau, "Le programme de recherche et développement en nanométrie au BNM-LNE", *Métrie* 2003,20-23 oct 2003, Toulon, France.

Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier H. Bachmair et R. Behr (PTB) pour leur contribution au développement du dispositif de mesure électrique de la balance du watt

Références

- [1] G. Girard, "The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992)," *Metrologia*, vol. 31, pp. 317–336, 1994.
- [2] B. P. Kibble, "A measurement of the gyromagnetic ratio of the proton by the strong field method," *Atomic Masses and Fundamental Constants 5 (edited by J. H. Sanders and A. H. Wapstra)*, New York, Plenum Press, pp. 545–551, 1976.
- [3] I. A. Robinson and B. P. Kibble, "Progress in relating the kilogram to Planck's constant with the NPL watt balance," *Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM, Conference Digest*, pp. 574–575, 2002.
- [4] E. R. Williams, R. L. Steiner, D. B. Newell, and P. T. Olsen, "Accurate measurement of the Planck constant," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 81, no. 12, pp. 2404–2407, 1998.
- [5] W. Beer, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard, A. Courteville, Y. Salvade, and R. Dandliker, "A proposal for a new moving-coil experiment," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 192–195, 1999.
- [6] M. Lecollinet, Ch. Bordé, M. Chambon, A. Clairon, T. Coorevits, N. Felin, 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.
- [7] Z. Silvestri, G. Genevès, A. Gosset, P.A. Meury ; P. Pinot "L'or platiné : alliage d'avenir de la métrologie des masses?" *Métrie* 2003,20-23 oct 2003, Toulon, France.
- [8] D. Haddad, L. Chassagne, S. Topçu, Y. Alayli, P. Juncar ; "Technique interférométrique hétérodyne de mesure et de position à l'échelle nanométrique d'un système mécanique en translation sur une grande étendue : application à la balance du watt", *Métrie* 2003,20-23 oct 2003, Toulon, France.
- [9] D. Holleville ; "Développement d'un gravimètre à atomes froids", *Métrie* 2003,20-23 oct 2003, Toulon, France.