

# Thèses de DOCTORAT de SCIENCES soutenues en 2004

Dans le cadre des études menées au Bureau national de métrologie (BNM), des travaux de thèses, en vue de l'obtention d'un Doctorat de sciences, sont effectués dans les laboratoires nationaux de métrologie ou les laboratoires associés du BNM. Les thèses soutenues en 2004 sont présentées ici par laboratoire mentionnant pour chaque thèse, l'auteur, le titre, l'établissement et la spécialité de rattachement, la date de soutenance et le résumé.

## BNM et LIRIS

**Darine HADDAD** – Mesure et contrôle de position et de vitesse à l'échelle nanométrique : Application à la balance du watt – Université de Versailles - Saint Quentin en Yvelines – *Optoélectronique* – 15 décembre 2004.

L'objet de ce travail est de contrôler la position et la vitesse d'une masse en mouvement avec une exactitude nanométrique sur une course de 80 mm. L'application essentielle est la balance du watt du Bureau national de métrologie.

Dans le cadre de la balance du watt, il est nécessaire de déplacer sur une distance de 80 mm – le long de l'axe gravimétrique – une bobine et son support plongés dans un champ magnétique. La masse à déplacer est de quelques centaines de grammes et la vitesse nominale est de  $2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . L'objectif est de contrôler la position avec une exactitude de l'ordre du nanomètre. Pour la vitesse, l'objectif fixé est d'obtenir une stabilité de  $10^{-9}$  en valeur relative.

Une méthode originale a été développée et mise en œuvre. La mesure et le contrôle sont basés sur un interféromètre hétérodyne de type Michelson. La résolution de mesure est de 0,31 nm. Une électronique haute fréquence a été développée afin de piloter l'interféromètre pour contrôler finement la phase optique de sortie. Celle-ci est asservie sur la phase d'un signal généré par une horloge

ultra-stable. Des sauts de position parfaitement connus et contrôlés dans le temps sont commandés par cette électronique. Le miroir mobile solidaire de la masse à déplacer est asservi par un système double étage. Un premier étage est constitué d'un moteur linéaire et assure la grande course de déplacement. Un second étage est constitué d'un actionneur piézoélectrique et assure en temps réel le positionnement nanométrique.

Il a été mesuré avec ce système des exactitudes et des répétabilités de positionnement inférieures au nanomètre et des stabilités de vitesse de quelques  $10^{-9}$  en valeur relative conformément à l'objectif fixé. Il apparaît que le principe devrait pouvoir être appliqué au prototype de la balance du watt avec les performances voulues. A terme, cette expérience permettra peut être de redéfinir le kilogramme étalon.

## BNM-SYRTE

**Shougang ZHANG** – Déplacement de fréquence dû au rayonnement du corps noir dans une fontaine atomique à césium et amélioration des performances de l'horloge – Université de Paris VI – *Physique quantique* – 9 juillet 2004.

FO1, du laboratoire BNM-SYRTE, a été la première fontaine à Cs fonctionnant comme un étalon primaire de fréquence dans le monde. La dernière évaluation d'exactitude en 2002 était de  $1\cdot 10^{-15}$  avec une mélasse

optique. Travaillant comme instrument, FO1 a contribué à la physique fondamentale et à des mesures extrêmement précises :

- la comparaison de la fréquence entre les fontaines à Cs et à Rb pendant un intervalle de 5 ans a fixé une limite supérieure à la variation possible de la constante de structure fine  $|\Delta\alpha/\alpha| < 2 \cdot 10^{-15} \text{yr}^{-1}$ . L'évaluation est environ 5 fois meilleur que celle obtenue précédemment au laboratoire.
- l'exactitude attendu pour l'horloge spatiale PHARAO est de  $1 \cdot 10^{-16}$ . Nous avons confirmé les performances de la cavité Ramsey en examinant la différence de phase entre les deux zones d'interaction dans la fontaine FO1.
- le déplacement de fréquence mesuré dans l'horloge à Cs dû au rayonnement du corps noir en fonction de la température  $T$  a donné :  $\Delta\nu(T) = 154(6) \cdot 10^{-6} (T/300)^4 [1 + \varepsilon(T/300)^2]$  Hz avec la valeur théorique  $\varepsilon = 0,014$ . Ce résultat représente une amélioration d'un facteur 3 par rapport à la mesure précédente par le group PTB.

Diverses améliorations ont été apportées à FO1. La nouvelle version de FO1 fonctionne directement en mélasse optique en utilisant un jet de césium ralenti comme source atomique. L'application de la méthode du passage adiabatique pour la sélection du niveau  $F = 3$ ,  $m_F = 0$  nous permet d'évaluer le déplacement de fréquence dû aux collisions entre atomes froids et à l'effet d'entraînement de fréquence par la cavité au niveau de  $10^{-16}$ . Les résultats récemment obtenus avec l'horloge FO1 améliorée montrent qu'elle est l'une des meilleures fontaines au monde: la stabilité de fréquence en utilisant l'oscillateur cryogénique en saphir est maintenant de  $2,8 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$ . L'exactitude est en cours d'évaluation. Quelques  $10^{-16}$  sont attendus.

**Florence Yver-LEDUC** – Caractérisation d'un capteur inertielle à atomes froids – Université de Paris XI – *Physique atomique* – 4 novembre 2004.

Depuis les développements des techniques de refroidissement d'atomes, les applications des ondes de matière ont fleuri. On présente la première réalisation d'un gyromètre fonctionnant sur des ondes associées à des atomes froids, dans le but d'atteindre une sensibilité et une stabilité inégalées. L'appareil, basé sur l'effet Sagnac, est un interféromètre atomique dont les séparatrices et miroirs sont réalisés à l'aide d'impulsions lasers induisant des transitions Raman stimulées aux nuages d'atomes froids de césium. En sortie de l'interféromètre, le déphasage dépend de la vitesse de rotation et de l'accélération de l'appareil. On utilise alors deux sources atomiques contra-propageantes afin de discriminer l'accélération de la rotation. Une géométrie novatrice permet de réduire les déphasages parasites

dus aux aberrations des optiques, en rétro-réfléchissant les faisceaux lasers réalisant les séparatrices.

L'obtention d'un premier signal et sa caractérisation sont présentées dans cette thèse. Grâce à la mise en place d'un système d'isolation des vibrations, les sensibilités obtenues sur une seconde sont de  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$  pour la rotation et  $6,2 \cdot 10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  pour l'accélération. Cette première caractérisation a mis en évidence la principale limite actuelle de l'appareil, qui est le nombre d'atomes utiles. Diverses modifications sur l'expérience permettront d'améliorer ce point.

Par ailleurs, un nouvel interféromètre a été testé, fournissant une mesure de l'axe de rotation horizontal perpendiculaire aux faisceaux lasers, habituellement inaccessible. Cette géométrie ouvre la voie à de nouveaux types de gyromètres, de très haute sensibilité et stabilité.

## FEMTO-ST/LPMO

**Pierre-Yves BOURGEOIS** – Référence secondaire de fréquence à résonateur saphir cryogénique – Université de Franche-Comté – *Science pour l'ingénieur* – 13 décembre 2004.

Ce mémoire présente l'élaboration et la caractérisation d'un étalon secondaire de fréquence à résonateur saphir cryogénique, dans la gamme des fréquences micro-ondes.

Le monocristal de saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), excité sur des modes électromagnétiques d'ordre élevé, les modes de galerie, et utilisé au voisinage de la température de l'hélium liquide, représente le meilleur candidat pour réaliser un oscillateur présentant une instabilité relative de fréquence de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-14}$ . Une dégénérescence du mode généralement observée aux températures cryogéniques rend difficile l'ajustement des couplages. Nous présentons ici un modèle simple expliquant correctement la séparation du mode en fréquence et les formes d'onde observées expérimentalement. D'autre part, le problème des modes parasites est résolu par la mise au point d'une structure résonante en cavité ouverte.

Tous les éléments nécessaires à la construction de cet oscillateur sont analysés en détails.

Les résultats obtenus sont tout à fait exceptionnels. Sur le court terme, l'instabilité relative de fréquence est inférieure à  $7,5 \cdot 10^{-15}$ . Dans le domaine du long terme, aucune dérive n'est clairement identifiée. La stabilité sur 1 jour est  $< 2 \cdot 10^{-14}$ . Ce dernier résultat constitue l'état de l'art pour des références secondaires de fréquence sur le long terme.

Enfin, d'autres travaux concernant la mesure des propriétés diélectriques d'un cristal de langasite, la caracté-

risation d'oscillateurs ultra-stables, la chaîne de synthèse, un oscillateur saphir-rutile compensé thermiquement, et l'observation d'un phénomène de bistabilité du résonateur saphir né de la coïncidence fortuite d'un mode de galerie du cristal avec celle de l'ion paramagnétique  $Fe^{3+}$ , sont également présentés.

### ENSAM-Paris/LMD

**Alessandro OLIVEIRA** – Contribution à l'étalonnage dynamique des capteurs de pression et modélisation de l'estimation de l'incertitude associée – ENSAM – *Mécanique* – 19 novembre 2004.

Cette thèse s'est déroulée au Laboratoire de Métrologie Dynamique de l'ENSAM et s'inscrit dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'ENSAM de Paris et l'Université de Brasilia du Brésil. L'étude réalisée a reçu le soutien de la CAPES (*Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nivel Superior* – MEC) et du BNM.

L'étalonnage dynamique d'un capteur de pression, c'est-à-dire la détermination de sa fonction de transfert, est réalisé en appliquant à l'entrée de celui-ci un signal test de pression et en enregistrant sa sortie. La fonction de transfert est définie comme le rapport de la transformée de Fourier de la sortie sur la transformée de Fourier de l'entrée.

L'objectif de ce travail est l'estimation de l'incertitude associée à la fonction de transfert d'un capteur de référence et de l'incertitude associée dans le cas d'un

étalonnage par comparaison à l'aide de ce capteur de référence. La méthode d'étalonnage dynamique d'un capteur de pression de référence repose sur l'inter-comparaison des résultats obtenus à l'aide de trois moyens d'étalonnage (tubes à choc TCR et TC20 et dispositif à ouverture rapide DOR20), dans des domaines de fréquence qui se recoupent deux à deux. Le signal d'entrée du capteur à étalonner est un échelon de pression. Le signal issu du capteur et de son électronique associée est filtré, converti en numérique puis stocké à l'aide d'un enregistreur de transitoire. Un logiciel adapté calcule la fonction de transfert. L'ensemble de ces moyens de génération de pression, d'acquisition et de traitement du signal, ainsi que les procédures associées, constituent "l'étalon collectif pression dynamique".

On se propose de montrer la méthodologie du calcul d'incertitude de mesure, en utilisant la norme NF ENV 13005 (ISO GUM) et la méthode de Monte-Carlo, pour l'étalonnage dynamique d'un capteur de pression de référence dans la bande de fréquence de 1 Hz à 10 000 Hz. La mise en œuvre de l'étalonnage dynamique nécessite différentes opérations qui visent à déterminer les informations nécessaires au calcul d'incertitude sur le capteur lui-même ainsi que sur la chaîne d'acquisition et de traitement. Les principales phases du processus sont : l'étalonnage quasi-statique du système d'acquisition, l'étalonnage quasi-statique du capteur de pression, l'étalonnage dynamique du système d'acquisition et l'étalonnage dynamique du capteur de pression de référence.