

# Thèses de doctorat en sciences soutenues en 2010

## *Ph.D. Thesis presented in 2010*

Dans le cadre des programmes d'études en métrologie coordonnés par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), des travaux de thèses, en vue de l'obtention d'un doctorat en sciences, sont effectués dans les laboratoires nationaux de métrologie ou les laboratoires associés au LNE. Les thèses soutenues en 2010 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 des travaux réalisés.

### **Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM)**

**Guillaume FAILLEAU** – Etude et développement d'un calorimètre adiabatique pour la caractérisation du point fixe de l'indium. Applications des mesures fluxmétriques à l'optimisation des cellules calorimétriques. – Université du Maine, Le Mans – *Thermique et énergétique* – 11 juin 2010.

L'Échelle Internationale de Température de 1990 (EIT-90) est matérialisée, pour les températures intermédiaires, du point triple de l'eau à 0,01 °C au point de congélation de l'argent à 961,78 °C, par un ensemble de points fixes liés aux transitions de phases solide-liquide (fusion) ou liquide-solide (congélation) de métaux de hautes puretés. Ces points fixes permettent d'étalonner les thermomètres à résistance de platine en mesurant leur réponse à des niveaux de température connus et imposés par le changement d'état des métaux considérés.

La méthode classique dite à flux permanent consiste à mettre en œuvre un point fixe dans une enceinte thermique dont la température reste légèrement différente de celle de la transition de phase du métal de référence. La mesure de température s'effectue ainsi dans un système constamment en état de déséquilibre thermique, et se trouve entachée d'incertitudes ayant pour sources des perturbations d'ordre thermique. De plus, la présence d'impuretés sous forme de traces dans le métal de référence entraîne des effets thermochimiques altérant la température de changement d'état, constituant une autre source d'incertitude. À

l'heure actuelle, les budgets d'incertitudes fournis par les laboratoires de métrologie ne distinguent pas les composantes thermiques et thermochimiques.

Les travaux réalisés dans le cadre de la thèse, associant le LAUM et le LNE, proposent une méthode alternative aux mises en œuvres classiques, par l'approche de la calorimétrie adiabatique. Le point de fusion de l'indium (156,598 5 °C) est étudié en s'affranchissant de toute perturbation thermique, permettant ainsi de quantifier les influences thermochimiques. Le calorimètre adiabatique conçu repose sur le principe d'une cellule point fixe au sein d'une autre cellule point fixe. Différents capteurs, thermométriques et fluxmétriques, ont été utilisés pour le contrôle thermique et le pilotage du dispositif. Au vu des conditions thermiques particulières obtenues dans ce dispositif original, une instrumentation spécifique et innovante a été développée, notamment des fluxmètres thermiques conductifs. Par ailleurs, le couplage des moyens de mesure de température et de flux thermique, a permis de développer de nouvelles approches analytiques pour les études énergétiques et thermodynamiques, apportant des enseignements nouveaux sur les phénomènes physiques associés aux réalisations des points fixes de température.

**Benoît POYET** – Conception d'un microscope à force atomique métrologique. – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Versailles – *Optoélectronique* – 8 juillet 2010.

Les microscopes en champ proche sont très largement utilisés pour caractériser des propriétés physiques à

l'échelle du nanomètre. Afin d'assurer la cohérence des mesures dimensionnelles et l'exactitude des résultats mesurés, ces microscopes ont besoin d'être étalonnés périodiquement. Ce raccordement à la définition de l'unité de longueur est assuré par le biais d'étalons de transfert dont les caractéristiques dimensionnelles peuvent être mesurées à l'aide d'un microscope à force atomique métrologique.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont pour but de développer en France le premier microscope à force atomique métrologique (AFM) capable d'étalonner ces échantillons de référence. Il s'agit d'un AFM dont les courses disponibles sont de 60  $\mu\text{m}$  dans le plan horizontal et 15  $\mu\text{m}$  suivant l'axe vertical. Les mesures de la position relative de la pointe AFM par rapport à l'échantillon sont réalisées à l'aide d'interféromètres différentiels dont la longueur d'onde est étalonnée afin d'assurer un raccordement direct à la définition du mètre étalon. Les incertitudes de mesure de la position de la pointe par rapport à l'échantillon sont de l'ordre du nanomètre.

Cet instrument est conçu de façon à minimiser l'impact des principales contributions qui dégradent le processus de mesure. Quatre axes de développement concourent à cet objectif :

- la minimisation de l'erreur d'Abbe par le développement d'une platine de guidage en translation à lames flexibles dont les rotations parasites sont de l'ordre du microradian sur l'ensemble de la gamme de déplacement ;
- l'optimisation de la chaîne métrologique ;
- l'optimisation des mesures interférométriques réalisées dans l'air ambiant afin de réduire leur sensibilité à l'indice de réfraction ;
- la réduction des effets thermiques sur le processus de mesure d'une façon générale, et sur la chaîne métrologique plus particulièrement.

Des résultats expérimentaux valident les choix de conception qui ont été faits et permettent de dresser un bilan d'incertitude prévisionnel pour la mesure de la position relative de la pointe AFM par rapport à l'échantillon.

## LNE/DMSI

**Mebrouk BAHOUCHÉ** – Étude et traçabilité du calibrage « *Line-Attenuator-Reflect* » pour des mesures sous pointes à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. – Telecom ParisTech – *Électronique et communications* – 2 décembre 2010.

Les paramètres  $S$  constituent l'une des grandeurs de base de l'électricité-magnétisme dans le domaine radiofréquence. Ils sont normalisés par rapport à une valeur d'impédance dite de référence et sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel.

La précision des paramètres  $S$  des composants micro-ondes avec un analyseur de réseau vectoriel dépend de l'exactitude du calibrage utilisé pour corriger les erreurs

inhérentes au système. Le calibrage consiste à mesurer des dispositifs particuliers plus ou moins bien connus, que l'on appelle étalons, afin de déterminer les erreurs systématiques du système avant la mesure du composant. Les coefficients d'erreurs calculés à partir de l'étalonnage seront utilisés pour caractériser les vrais paramètres  $S$  du dispositif.

La procédure de calibrage LAR (*Line-Attenuator-Reflect*), intégrée dans les analyseurs modernes et qui permet une large bande de mesure avec un nombre limité d'étalons de référence sur le *wafer*, est particulièrement attractive. Par contre, peu d'études ont été réalisées pour évaluer la traçabilité de cette méthode. C'est pourquoi le LNE a décidé de mener des études afin d'évaluer la traçabilité et la précision de mesure quand la méthode de calibrage LAR est utilisée. Dans ce contexte les travaux de thèse ont consisté à :

- réaliser un kit de calibrage sur *wafer* pour exécuter à la fois le calibrage LAR et *Multiline* TRL qui est le calibrage de référence pour les mesures sur *wafer* ;
- proposer une méthode basée sur un calcul d'erreur pour tenir compte du fait que les impédances d'entrée et de sortie de l'atténuateur étalon sont différentes de 50  $\Omega$ . Outre sa précision, l'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas la détermination précise de l'impédance de référence du calibrage LAR.
- proposer une méthode originale analytique pour déterminer l'impédance d'entrée et de sortie de calibrage et donc l'impédance de référence.
- réaliser un kit de calibrage large bande pour les utilisateurs, dont l'impédance de référence du calibrage LAR peut être obtenue par trois moyens : modélisation électrique de l'atténuateur, modélisation de l'impédance de référence par interpolation polynomiale et méthode simplifiée (procédure LAR-L).
- l'analyse des erreurs dans le cas où le substrat du kit de calibrage est différent du substrat de dispositif à caractériser. Ces erreurs sont dues à la capacité de couplage entre les pointes et le substrat. Afin de réduire ces erreurs, une solution pour déterminer cette capacité de couplage a été proposée. Elle consiste à graver sur le *wafer* du dispositif sous test une ligne de transmission dont les dimensions doivent être connues, et dont on mesure les paramètres  $S$  après calibrage de l'analyseur de réseau vectoriel.

## LNE-LTFB

**Serge GROUPEL** – Elisa, une référence de fréquence ultrastable pour l'Agence spatiale européenne. – Université de Franche-Comté – *Sciences pour l'ingénieur* – 10 novembre 2010.

Elisa est un oscillateur saphir cryogénique (CSO) dont la vocation est d'équiper la nouvelle station sol de Agence spatiale européenne (ESA). Les performances requises sont une stabilité de fréquence  $\sigma_y(\tau) \leq 3 \times 10^{-15}$  pour  $\tau \in [1 \text{ s}; 1000 \text{ s}]$  et un bruit de phase  $\sigma_\phi(1 \text{ Hz})$  égal à

$-93 \text{ dB}\cdot\text{rad}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$  pour une autonomie de deux ans. Cette référence de fréquence doit également posséder des sorties aux fréquences de 10 GHz, 100 MHz et 5 MHz pilotées par le CSO.

Elisa intègre, dans une boucle d'entretien, un résonateur saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) excité sur des modes de galeries (WG) et refroidi à 4,2 K dans un cryogénérateur. À cette température, le facteur de qualité à vide peut atteindre  $1\times 10^9$ . Le mode opérationnel  $\text{WGH}_{15,0,0}$  a été choisi par rapport à notre savoir-faire et aux publications. Sa fréquence de résonance a été fixée à 10 GHz –  $D$  où  $D$  est un « intervalle de confiance » égal à 10 MHz. La fréquence de 10 GHz est suffisamment éloignée des fréquences de transition des ions paramagnétiques présents dans le cristal de saphir et l'écart de fréquence  $D$  permet de faire face aux tolérances d'usinage.  $D$  peut être compensé par l'intermédiaire d'un « *Direct Digital Synthesizer* » intégré dans la chaîne de synthèse pour atteindre 10 GHz. Les dimensions du cylindre de saphir ont été calculées par la méthode des éléments finis.

Après avoir validé les caractéristiques du résonateur, différentes méthodes de couplage ont été expérimentées dans le but d'atteindre une sélection modale performante.

Tous les éléments nécessaires à la construction d'Elisa sont analysés en détail. Une méthode originale de mesure de bruit d'amplitude des détecteurs quadratiques, l'étude de dispositifs électroniques de faible bruit, le principe d'une chaîne de synthèse sur la base d'un DDS et la description de deux technologies cryogéniques sont présentées. Pour ces dernières, l'étude a été focalisée sur un modèle de cryogénérateur à faible vibration mécanique.

Les performances démontrées par Elisa satisfont le cahier des charges de l'ESA. Une stabilité de fréquence inférieure à  $3\times 10^{-15}$  a été mesurée pour  $\tau \in [1 \text{ s} ; 1000 \text{ s}]$ .

Elle atteint  $1,4\times 10^{-15}$  à  $\tau = 20 \text{ s}$ . La mesure de bruit de phase montre  $\sigma_\phi(1 \text{ Hz}) = -98 \text{ dB}\cdot\text{rad}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$ . La chaîne de synthèse permet le transfert des performances du CSO aux fréquences de 10 GHz et 100 MHz. La stabilité journalière de  $4,5\times 10^{-15}$  place Elisa au meilleur niveau pour de tels oscillateurs.

## LNE-SYRTE

**Clément LACROÛTE** – Développement d'une horloge atomique sur puce à atomes : optimisation de la durée de cohérence et caractérisation préliminaire. – Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 – *Physique* – 29 janvier 2010.

L'objet de la thèse est la construction et la caractérisation préliminaire d'une horloge atomique sur puce à atomes. La transition d'horloge est la transition micro-onde à deux photons entre les niveaux  $|F=1, m_F=-1\rangle$  et  $|F=2, m_F=1\rangle$  du  $^{87}\text{Rb}$ . Les atomes sont piégés magnétiquement et refroidis à une température de quelques centaines de nanokelvin, pouvant atteindre la température de condensation de Bose-Einstein. La spectroscopie Ramsey est effectuée à un champ  $B_0 = 3,23 \text{ G}$  pour laquelle le déplacement Zeeman de la

transition ne dépend du champ magnétique qu'au second ordre, ce qui permet de réduire la sensibilité de l'horloge aux fluctuations extérieures de champ magnétique. Le signal micro-onde de spectroscopie est couplé aux atomes à l'aide d'un guide d'onde coplanaire intégré à la puce ; l'ensemble du cycle d'horloge est donc effectué dans un volume réduit de  $(5 \text{ cm})^3$ . Avec ce dispositif, une durée de cohérence supérieure à 15 s de la superposition cohérente des états d'horloge a été mesurée. Avec une durée de Ramsey de 3 s, la première évaluation de la stabilité de l'horloge donne  $6\times 10^{-12}$  à 1 s, limitée par le bruit technique du dispositif. L'objectif est d'atteindre une stabilité de l'ordre de  $10^{-13}$  à 1 s, meilleure que celle des horloges commerciales actuelles.

**Arnaud LECALLIER** – Contribution à la réalisation d'une nouvelle horloge à réseau optique à atomes piégés de strontium. – Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 – *Physique quantique* – 28 juin 2010.

La thèse porte sur le concept d'horloge à réseau optique à atomes de strontium tel qu'il est mis en œuvre sur un premier dispositif au LNE-SYRTE, sur les résultats expérimentaux obtenus avec cette horloge lors de la campagne de spectroscopie effectuée au début de la thèse sur le fermion  $^{87}\text{Sr}$ , et sur la mise en perspective avec les performances ultimes attendues. Cette évaluation à un niveau d'exactitude de  $2,6\times 10^{-15}$  amène à justifier les motivations pour la conception d'une nouvelle horloge à réseau optique au strontium indépendante. Les étapes de la réalisation de cette nouvelle horloge sont ensuite détaillées, en insistant sur les améliorations apportées vis-à-vis de la première :

- mise en place de l'enceinte à vide où le jet atomique est tour à tour éjecté du four, défléchi, ralenti puis capturé au niveau d'un piège magnéto-optique. L'étape de déflexion constitue une nouveauté qui contribue à l'amélioration des performances ; elle a fait l'objet d'une simulation numérique préalable validée par l'expérience ;
- description du réseau optique où les atomes sont transférés et confinés par interaction dipolaire avec la démonstration de la possibilité de réaliser efficacement ce piégeage à l'aide uniquement de sources laser à semi-conducteur, moyennant la diminution des effets de chauffage paramétrique grâce à la stabilisation en amont du bruit de fréquence de cette source ;
- le refroidissement des atomes piégés, leur interrogation à l'aide d'un nouveau laser ultra-stable, et la détection de la probabilité de transition d'horloge a conduit *in fine* à observer des premiers signaux de résonance atomique.

Enfin, les premières séries de comparaisons entre les deux horloges au strontium du laboratoire viennent conclure ce travail.

**Sébastien MERLET** – Détermination absolue de  $g$  dans le cadre de l'expérience de la balance du Watt. – Observatoire de Paris – *Astronomie et Astrophysique* – 5 juillet 2010.

Le projet balance du watt propose de relier la définition du kilogramme à la constante de Planck  $h$ . La pesée de la masse impliquée nécessite une détermination de l'accélération de la pesanteur  $g$  avec une exactitude meilleure que  $10^{-8}$ . Cette thèse vise à réaliser cette détermination à l'aide d'un gravimètre atomique et d'un site gravimétrique dédié. Avec un gravimètre relatif caractérisé, une cartographie gravimétrique des deux massifs consacrés à l'expérience du LNE a été réalisée puis un modèle des variations de gravité a été développé. Il permet de déterminer la différence de gravité entre deux points dans un volume de  $50 \text{ m}^3$  au-dessus des massifs avec une incertitude inférieure à  $3 \mu\text{Gal}$  ( $3 \times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ). Entre les deux points centraux, l'incertitude est inférieure au  $\mu\text{Gal}$ . La détermination absolue de  $g$  est réalisée avec un nouveau gravimètre absolu mobile à ondes de matières de  $^{87}\text{Rb}$ . Sa conception repose sur le travail débuté en 2002 avec la réalisation d'un prototype dont les limites ont été identifiées. Les différents éléments de ce nouveau gravimètre sont caractérisés dans la thèse. Les premiers signaux ont été obtenus en 2009 puis l'instrument a été le premier gravimètre atomique à participer à une comparaison internationale, l'*International Comparison of Absolute Gravimeters* de 2009 au BIPM. La caractérisation de l'instrument a été poursuivie sur le site du LNE où la sensibilité atteint un plateau à  $0,4 \mu\text{Gal}$  après 100 min de mesure. Le budget d'incertitude obtenu de  $5,4 \mu\text{Gal}$  a été éprouvé lors d'une comparaison bilatérale avec un FG5 : l'écart de mesure obtenu est de  $(4,3 \pm 6,2) \mu\text{Gal}$  ( $k = 1$ ).

**Jacques MILLO** – Génération de signaux micro-ondes pour la métrologie à partir de références et de peignes de fréquences optiques. – Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 – *Physique* – 26 juillet 2010.

Les travaux présentés dans cette thèse de doctorat portent sur l'étude et la réalisation d'un système de génération de signaux micro-ondes à très bas bruit de phase et à haute stabilité de fréquence. De tels signaux sont obtenus en asservissant en fréquence le taux de répétition d'un laser femtoseconde à fibre sur une référence de fréquence optique ultra-stable. On est ainsi capable de transférer la stabilité relative de fréquence d'une référence optique dans le domaine micro-onde.

Dans un premier temps, des lasers ultra-stables ont été développés afin de servir de référence. Ils sont obtenus en asservissant en fréquence un laser sur une cavité Fabry-Perot utilisée comme étalon de fréquence. Des cavités Fabry-Perot permettant d'atteindre une stabilité relative de fréquence de l'ordre de  $4 \times 10^{-16}$  à 1 s ont donc été conçues. L'étude qui s'appuie sur des calculs numériques a permis de minimiser l'influence de la source de bruit dominante : les vibrations de l'environnement des cavités.

Cette démarche a donné lieu à la réalisation de deux lasers ultra-stables dont la comparaison atteint une

stabilité relative de fréquence de  $5,8 \times 10^{-16}$  à 1 s. La longueur des cavités étant de 100 mm, ce résultat est possible grâce à l'emploi de substrat de miroirs en silice fondue qui permet de suffisamment réduire le bruit thermique des miroirs de la cavité.

Ensuite, le peigne de fréquence optique produit par un laser femtoseconde fibré est stabilisé sur un laser ultra-stable similaire ( $1,4 \times 10^{-15}$  à 1 s) pour générer un signal micro-onde de l'ordre de 12 GHz avec une stabilité inférieure à  $4 \times 10^{-15}$  entre 1 s et 50 s. L'horloge atomique à fontaine (FO2), interrogée avec ce signal, atteint une stabilité de  $3,5 \times 10^{-14} \times \tau^{-1/2}$ , sa limite fondamentale imposée par le bruit de projection quantique. La contribution du bruit du signal d'interrogation sur la stabilité de l'horloge (effet Dick) est ainsi rendue négligeable.

La limitation ultime du processus de transfert de l'optique vers la micro-onde provient du bruit intrinsèque du laser femtoseconde, de la photodiode détectant le signal micro-onde et du bruit des amplificateurs. Cette limitation a été mesurée en utilisant la même référence optique pour deux lasers femtosecondes identiques. Après optimisation du système, elle a été évaluée au niveau de  $3 \times 10^{-16}$  entre 1 s et 10 s.

**Thomas LÉVÈQUE** – Développement d'un gyromètre à atomes froids de haute sensibilité fondé sur une géométrie repliée – Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 – *Physique* – 29 septembre 2010.

Depuis les premières expériences de principe, l'interférométrie atomique a connu un essor important lié notamment à la maîtrise des processus de refroidissement d'atomes par laser et à l'utilisation de transitions cohérentes à deux photons pour les manipuler. La thèse présente le développement d'un gyromètre atomique à effet Sagnac de haute sensibilité fondé sur une configuration repliée. Les choix expérimentaux réalisés lors de la conception de ce nouvel appareil ont été guidés par l'étude d'un premier prototype afin de repousser ses limites techniques. La première partie du travail a consisté en la caractérisation du premier gyromètre et à l'étude de ses performances limites liées à la fluctuation du biais introduit par les défauts de front d'onde du faisceau Raman. Cet appareil a également permis de mettre en place une méthode de mesure utilisant un sismomètre pour mesurer puis soustraire les accélérations parasites du signal de l'interféromètre assurant ainsi un niveau de sensibilité intéressant dans un environnement perturbé. L'étude a ensuite porté sur le test de nouvelles séparatrices atomiques en double-diffraction permettant d'accroître l'aire d'un interféromètre. La dernière partie du travail s'est concentrée sur le développement d'un nouveau prototype. Les résultats préliminaires de cette expérience fondée sur une configuration à quatre impulsions Raman stimulées sont présentés dans la thèse. Cette première caractérisation ouvre la voie à des mesures atteignant des niveaux de sensibilité inégalés pour ce type de capteurs.

**Haifeng JIANG** – Développement de sources laser ultra-stables et de liaisons optiques de longue distance par des réseaux de télécommunication – Université Paris 13 – *Physique* – 26 octobre 2010.

Le transfert des fréquences ultra-stables entre laboratoires distants est requis par de nombreuses applications concernant la métrologie temps/fréquence, la physique fondamentale, les accélérateurs de particules et l'astrophysique. Cette thèse décrit le développement de liaisons optiques ultra-stables sur des distances de 86 km à 300 km. L'objectif à long terme est de développer des liens optiques de 1 000 km environ afin de relier les principaux instituts nationaux de métrologie en Europe.

Le lien optique est basé sur le transfert de la phase optique d'un laser ultra-stable de longueur d'onde 1 542 nm par une fibre optique du réseau de télécommunications. Pour cela ont été développés des lasers stabilisés sur cavité Fabry-Perot et sur fibre optique. L'instabilité relative des lasers stabilisés sur cavité est de l'ordre de  $10^{-15}$  pour un temps d'intégration de 1 s. Les lasers stabilisés sur fibre sont robustes, compacts, simples, accordables et leur bruit de fréquence est comparable à celui des lasers stabilisés sur cavité pour des fréquences supérieures à quelques dizaines de hertz. Les liens optiques ont d'abord été démontrés sur 86 km et 172 km en utilisant des fibres dédiées reliant les laboratoires LNE-SYRTE et LPL. L'instabilité relative de fréquence obtenue était de l'ordre de  $10^{-19}$  pour des temps d'intégration de 104 s. Pour des distances plus grandes, le signal ultra-stable est transféré directement sur le réseau Internet en utilisant un canal de fréquence dédiée, par la technique de multiplexage en longueur d'ondes. Un lien multiplexé a ainsi été démontré sur une distance de 300 km, avec une instabilité relative de fréquence au même niveau qu'avec des fibres dédiées.

**Philip WESTERGAARD** – Horloge à réseau optique au strontium : en quête de la performance ultime. – EDITE de Paris – *Electronique et communications* – 29 octobre 2010.

Ce mémoire présente les dernières avancées de l'horloge à réseau optique à atomes de strontium du LNE-SYRTE. Après avoir passé en revue les principes généraux des horloges à réseau optique et le fonctionnement de l'horloge, l'accent est mis sur les améliorations qui ont été apportées à l'expérience depuis 2007. Les éléments les plus importants sont une nouvelle cavité ultra-stable de référence pour le laser d'horloge, le développement d'une technique de détection non-destructive, et la construction d'une deuxième horloge à réseau optique de strontium. La cavité ultra-stable est composée d'un *spacer ULE* et deux miroirs en silice fondue et a montré un niveau de bruit thermique à  $6,5 \times 10^{-16}$ , ce qui la place parmi les meilleures du monde.

La détection non-destructive est réalisée par une mesure de phase d'un faisceau sonde de faible intensité qui traverse les atomes placés dans un bras d'un interféromètre Mach-Zehnder. L'aspect non-destructif permet de recycler les atomes d'un cycle à l'autre et augmente par conséquent le rapport cyclique, ce qui permet d'optimiser la stabilité de l'horloge. Avec ces nouveaux outils la stabilité de fréquence attendue est à  $2,2 \times 10^{-16} \times \tau^{-1/2}$  pour une séquence optimisée. Les comparaisons les plus récentes entre les deux horloges à strontium atteignent un niveau de stabilité de  $1 \times 10^{-16}$  après environ 1 000 s, ce qui a permis de caractériser les décalages de fréquence liés au réseau avec une précision sans précédent. Ces mesures assurent un contrôle des effets liés au réseau au niveau de  $1 \times 10^{-18}$ , même pour des profondeurs de piège aussi grandes que  $50 \cdot E_r$ .

**Quentin BODART** – Gravimétrie atomique: amélioration de l'exactitude et nouvelles géométries – Université Pierre et Marie Curie, Paris 6 – *Physique atomique* – 17 novembre 2010.

L'objectif du gravimètre absolu est de déterminer la valeur de l'accélération de pesanteur avec une incertitude relative de  $10^{-9}$  pour le projet métrologique de « balance du watt ». A cette fin une nouvelle enceinte à vide permettant l'évaluation des effets systématiques limitant a été développée. Le gravimètre a été rendu transportable et placé à côté de la balance du watt du LNE à Trappes.

Le principe du gravimètre repose sur des techniques d'interférométrie atomique, où un nuage d'atomes froids de  $^{87}\text{Rb}$  en chute libre est manipulé au moyen de transitions à deux photons dites « Raman ». L'incertitude a été réduite sur l'ensemble des biais au-dessous de l'objectif fixé, excepté en ce qui concerne l'effet des aberrations du front d'onde des faisceaux lasers. Il est actuellement l'objet d'investigations et le laboratoire cherche désormais à contrôler le mieux possible la trajectoire des atomes.

Au cours de l'année 2010, le gravimètre atomique a participé à plusieurs comparaisons, notamment une comparaison internationale, avec d'autres gravimètres de références nationaux. Les valeurs de  $g$  obtenues sont en accord, mais des fluctuations de l'écart ont été relevées avec les autres gravimètres, liées en partie aux variations de l'effet d'aberration.

Trois nouvelles techniques de mesures d'interférométrie atomique ont été développées en parallèle. La première utilise un algorithme à trois coups qui rend la mesure robuste aux vibrations. La seconde consiste à diffracter les atomes simultanément au moyen des quatre champs présents dans l'enceinte à vide afin de doubler l'aire de l'interféromètre et donc sa sensibilité intrinsèque. Enfin, une pyramide creuse a été conçue et réalisée, qui permet de substituer aux différents lasers un unique large faisceau, afin de créer un gravimètre atomique compact transportable.