

Thèses de Doctorat de sciences soutenues en 2008

Ph.D thesis presented in 2008

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 de sciences, sont effectués dans les laboratoires nationaux de métrologie ou les laboratoires associés au LNE. Les thèses soutenues en 2008 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.

LNE/DMSI

François ZIADE – Faisabilité d'un étalon calculable de puissance hautes fréquences. – Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris – *Electronique et communications* – 8 avril 2008.

Pour la plupart des laboratoires nationaux de métrologie, l'étalon de puissance hautes fréquences (HF) est constitué d'un microcalorimètre associé à une monture bolométrique. Toutefois, des efforts constants sont menés pour établir d'autres références. Ainsi, ce travail de thèse, effectué au sein du groupe HF du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) et du groupe Radiofréquences et Micro-ondes (RFM) de l'école TELECOM ParisTech, vise à étudier la faisabilité d'un étalon calculable de puissance à haute fréquence. Ce dernier permettrait de s'affranchir de toute procédure d'étalonnage car il serait alors raccordé directement aux principes physiques et mathématiques.

Cette thèse a pour objectif de modéliser entièrement l'étalon afin d'en calculer l'efficacité, η , qui est son paramètre métrologique et qui représente ses pertes. Dans un premier temps, un étalon de puissance innovant a été réalisé en technologie coplanaire (CPW) avec un coefficient de réflexion adapté jusqu'à 8 GHz. Dans un second temps, des simulations électromagnétiques 3D et des mesures *Multiline* TRL (*Thru-Reflect-Line*) ont permis d'établir son modèle électrique complet :

- la transition du connecteur SMA vers la ligne CPW ;

- le rayonnement ;
- la constante de propagation, γ , et l'impédance caractéristique, Z_c , de la ligne CPW ;
- les capacités de découplage ;
- l'interaction entre les composants.

L'écart moyen obtenu entre l'efficacité calculée et l'efficacité mesurée au microcalorimètre est inférieur à 1,2 %. La très bonne concordance obtenue entre le calcul et la mesure ouvre la voie vers un étalon calculable de puissance haute fréquence.

Marwan WAKIM – Contrôle de la position et de la vitesse d'une masse à l'échelle nanométrique : application à la balance du watt du LNE. – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines – *Optoélectronique* – 14 mai 2008.

Le kilogramme est la seule unité de base du système international encore définie par un artefact matériel. Le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) développe, dans le cadre d'un projet fédéré, une expérience nommée balance du watt dont le but est de contribuer à la redéfinition de l'unité de masse.

Les travaux réalisés, au cours de cette thèse, ont pour but de contrôler, sur une plage de l'ordre de quelques centimètres, la vitesse de déplacement et le positionnement d'une bobine à l'aide d'un dispositif constitué d'un interféromètre hétérodyne associé à une platine de translation et à un actionneur piézo-électrique.

Une source laser a été développée afin de mieux adapter la méthode aux contraintes exigées par la balance du watt. La méthode de contrôle de vitesse permet une instabilité résiduelle relative de $2,4 \cdot 10^{-9}$ pour un simple miroir pesant quelques grammes et de $4,2 \cdot 10^{-7}$ pour une masse de 1 200 g, ceci sur 100 s de temps d'intégration. La méthode développée a par ailleurs démontrée son utilité dans d'autres applications en nanométrie.

Karim OUEDRAOGO – Capteurs interférométrique et ellipsométrique : application à la nanométrie et à la balance du watt française. – Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines – *Optoélectronique* – 27 juin 2008.

La première partie de la thèse regroupe l'ensemble des travaux relatifs à la métrologie dimensionnelle à l'échelle du nanomètre. Après avoir donné une vue générale de l'instrumentation interférométrique utilisée dans ce domaine et montré leurs limites, la réalisation d'un interféromètre ellipsométrique et d'un λ damètre optique est présentée. Les résultats expérimentaux ont montré la possibilité d'atteindre une résolution de 10 pm sur une étendue de mesures macroscopique pour l'interféromètre et une exactitude de 10^{-6} en valeur relative sur la longueur d'onde avec notre λ damètre pour un déplacement du miroir mobile de seulement 4 μ m au lieu de 150 mm pour le schéma conventionnel.

La seconde partie de la thèse regroupe l'ensemble des travaux relatifs à la métrologie des masses. Après une description du projet national de la balance du watt dont l'objectif vise une redéfinition du kilogramme, les travaux portant sur la réalisation d'un capteur polarimétrique sensible à la direction radiale du champ magnétique de l'aimant permanent composant la balance du watt du Laboratoire national de métrologie et d'essais et d'un inclinomètre interférométrique pour la matérialisation de l'axe gravitationnel terrestre, sont décrits.

Dominique RODRIGUES – Méthode de réciprocité : caractérisation de petits composants acoustiques, étalonnage des microphones en pression et en champ libre. – Université du Maine – *Acoustique* – 24 octobre 2008.

L'étalonnage absolu des microphones de mesure en acoustique repose sur l'obtention d'étalons primaires, eux-mêmes étalonnés suivant un protocole sophistiqué (méthode de réciprocité) et conformément aux normes en vigueur ; ces normes ont fait l'objet d'améliorations au cours des dernières décennies mais laissent toujours des zones d'ombre. Parallèlement, la caractérisation appropriée des oreilles artificielles, nécessaire au réglage des audiomètres et par suite à leur étalonnage, fait aujourd'hui défaut.

Ce propos met en cause l'incertitude d'étalonnage des étalons de mesure de pressions acoustiques et l'insuffisance des réglages d'appareils médicaux largement

utilisés. C'est ainsi que les thèmes abordés font appel ici à la méthode de la réciprocité en cavité et en champ libre.

Dans la première partie du travail, l'objectif recherché est d'adapter et d'améliorer la méthode de réciprocité en cavité. L'adaptation de cette méthode conduit à une technique de mesure d'impédances d'entrée de petits éléments acoustiques, tels que des tubes, fentes, cavités (utilisés dans l'oreille artificielle). L'amélioration des incertitudes de mesure des efficacités recherchée pour les hautes fréquences a conduit à proposer une modélisation améliorée d'un microphone ainsi que du dispositif d'étalonnage dans sa globalité de manière à étudier l'influence des modes radiaux dans la cavité sur les résultats de l'étalonnage.

La deuxième partie de ce travail trouve son origine dans une comparaison clé à l'échelle internationale portant sur les techniques d'étalonnage des microphones en champ libre. Cette comparaison clé a nécessité une refonte complète du dispositif expérimental du LNE, des techniques d'acquisitions et des méthodes de filtrage des perturbations liées aux faibles niveaux acoustiques mis en jeu. Ce travail a conduit à entreprendre des études plus approfondies sur les plans analytique et expérimental du concept de centre acoustique d'un microphone.

Certains résultats obtenus posent les bases des travaux futurs qui devraient permettre de poursuivre la modélisation pour réduire les incertitudes mais également pour prévoir la mise en oeuvre des méthodes adaptées à la métrologie des capteurs du futur qui seront fabriqués par des procédés relevant des microtechnologies.

Isabelle MORGADO – Conception et réalisation d'une chaîne complète d'étalonnage pour la mesure des débits de fuites de fluides frigorigènes. – Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – *Energétique* – 14 novembre 2008.

Le règlement européen n° 842/2006 ayant pour objectif la réduction des gaz à effet de serre vise à une politique de contrôle de l'étanchéité des équipements contenant plus de 3 kg de fluide. En France, l'arrêté du 7 mai 2007 spécifie que les contrôles doivent être effectués par un détecteur de fuite manuel d'une sensibilité de 5 g/an ou un contrôleur d'ambiance avec une sensibilité de 10 μ mol/mol. Ces sensibilités doivent être mesurées suivant la norme EN 14624. Cette norme préconise l'utilisation de fuites calibrées de R-134a dont le débit varie de 1 g/an à 50 g/an. Il est indispensable de disposer de fuites étalons permettant de vérifier les mesures effectuées. Comme une chaîne de mesure des débits de fuites hélium est déjà mise en place, une analyse des méthodes de mesures utilisées a mis en évidence la nécessité de développer une nouvelle méthode pour la mesure des débits de fuites de fluides frigorigènes. Pour répondre au besoin, le Centre d'Energétique et Procédés a développé une méthode de mesure basée sur l'absorption infrarouge. Elle consiste à mesurer la variation dans le temps de la concentration du gaz émis par une fuite, accumulée dans un volume fermé, dit volume

d'accumulation. Basée sur cette méthode, une référence nationale destinée à définir des débits de fuites de fluides frigorigènes, se situant entre 1 g/an et 50 g/an, a été conçue par le LNE et le CEP, avec le soutien de l'ADEME. Les phases de la conception sont présentées. En particulier, comme la méthode repose essentiellement sur la mesure d'une variation de concentration dans un volume à mesurer, le choix de la méthode de mesure de la variation de concentration et le choix de la méthode de mesure du volume d'accumulation ont été définis comme les étapes clés de la conception et sont argumentés. Une fois l'étude de conception achevée, la référence nationale a été réalisée et qualifiée. Le débit de fuite est calculé à partir de grandeurs différentes, à savoir la concentration, la pression, la température et le volume d'accumulation. La chaîne de mesure de ces grandeurs a donc été analysée afin d'estimer les modes opératoires et les incertitudes associées à l'estimation de chacune des grandeurs. Le budget d'incertitude du débit d'une fuite calibrée a finalement été établi. Une fois la traçabilité des débits de fuites frigorigènes assurée, le seuil de sensibilité des détecteurs frigorigènes peut être mesuré suivant les normes prévues telles que la norme européenne EN 14624 ou d'autres normes comme la norme SAE ou le projet de norme ASHRAE. Des études théoriques, phénoménologiques et expérimentales ont permis d'identifier les paramètres d'influence de la mesure du seuil de sensibilité et de conclure sur les précautions à prendre lors des essais. Enfin, une extension de l'étude a mis en évidence quelques précautions à prendre lors de détection sur site avec des détecteurs qualifiés.

Khadija EL MRABET – Développement d'une méthode d'analyse de résidus de pesticides par dilution isotopique associée à la chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem dans les matrices céréalières après extraction en solvant chaud pressurisé. – Université Pierre et Marie Curie de Paris – *Chimie analytique* – 24 novembre 2008.

Les pesticides sont aujourd'hui reconnus comme ayant des effets néfastes sur la santé humaine. Les limites maximales de résidus (LMR) de pesticides autorisées dans l'eau et les aliments sont de plus en plus faibles. Ainsi, des techniques analytiques très performantes sont indispensables pour leur identification et leur quantification.

Cette thèse a pour objectif de développer une méthode d'analyse multirésidus de pesticides dans les matrices céréalières par chromatographie en phase liquide (CPL) couplée à la spectrométrie de masse en tandem (SM²) après une étape d'extraction en solvant chaud pressurisé. Une première méthode d'analyse de phénylurées et de triazines dans les eaux souterraines par dilution isotopique (DI) associée à la CPL/SM² après une étape d'extraction sur phase solide a été développée. Celle-ci a été validée par la participation à un essai inter-laboratoires. Une méthode d'extraction de pesticides dans le blé associée à une analyse par CPL/SM² a ensuite été développée pour

trente-huit pesticides représentatifs de vingt-six familles chimiques et quatorze de leurs molécules marquées.

La chromatographie à polarité de phase inversée a été mise en œuvre. Les conditions de séparation et de détection ont été optimisées. Un protocole analytique global comprenant une étape d'extraction à l'acétonitrile à chaud (100 °C) sous pression (10⁷ Pa ou 100 bar) suivie d'une étape de purification de l'extrait obtenu sur un adsorbant de nature polymérique a été mise en œuvre.

Par cette approche, il a été possible d'analyser l'ensemble des molécules ciblées avec un taux de récupération moyen de l'ordre de 85 % (CV = 4 %, n = 3). Si ces résultats sont très satisfaisants, ils ont, par ailleurs, souligné que l'application de la dilution isotopique est complexe. Malgré, quelques améliorations à apporter notamment concernant différents essais sur matrices vieilles ou contaminées, le potentiel de la méthode développée a été démontré.

François VILLAR – Conception, réalisation et caractérisation de systèmes mécaniques pour l'expérience française de « balance du watt ». – Conservatoire national des arts et métiers de Paris – *Lasers, métrologie et instrumentation* – 10 décembre 2008.

En vue de contribuer à une possible redéfinition du Système international d'unités, les laboratoires nationaux de métrologie français développent une expérience de balance du watt.

Cette expérience, dont le principe a été proposé en 1976 par B. Kibble (NPL), permet de relier la masse m d'un étalon (raccordé au prototype international du kilogramme) à la constante de Planck h . Pour permettre, à terme, de redéfinir l'unité de masse en fixant la valeur de cette constante, la mesure du rapport h/m doit être réalisée avec une incertitude relative de l'ordre de 10⁻⁸.

La mise en œuvre de l'expérience exige de construire des systèmes mécaniques, un circuit magnétique et un système de translation notamment.

Pour l'expérience du LNE, les conceptions ont été choisies comme il suit :

- un circuit magnétique à aimants permanents délivrant un champ d'induction axisymétrique, d'intensité égale à un tesla environ, et dont l'amplitude des variations doit être limitée à 10⁻⁴ en valeur relative dans la partie utile de l'entrefer ;
- un système de translation à liaisons flexibles contraignant une bobine à se déplacer dans l'entrefer du circuit selon une translation rectiligne et verticale d'une longueur de 80 mm.

Les effets, sur le résultat de l'expérience, des écarts de réalisation du circuit magnétique et du système de translation par rapport à leur définition nominale effets sont étudiés. Les écarts admissibles en sont déduits, tenant compte des compromis incontournables dans toute réalisation et nous présentons la conception, la réalisation et la caractérisation des deux systèmes mis en œuvre.

Elise TOLLENS-CARVALHO – Diffusion des rayonnements X pour la caractérisation de la rugosité superficielle. – Conservatoire national des arts et métiers de Paris – *Lasers, métrologie, communications* – 9 juillet 2008.

Des éléments de la théorie vectorielle de la diffusion des rayonnements électromagnétiques ont été développés dans ce travail, en vue d'une application à la caractérisation de la rugosité de surfaces métalliques. Cette théorie relie, *via* un facteur « optique » $W_{ii}(\theta)$, la répartition angulaire de l'intensité $I(\theta)$ du rayonnement diffusé par une surface à sa densité spectrale de puissance (DSP). Une première étude a montré qu'en mode « *rocking curve* », le facteur $W_{ii}(\theta)$ (calculé à la longueur d'onde de travail $\lambda = 0,1540$ nm) reproduisait fidèlement l'intensité des deux maxima (pics de Yoneda) de l'indicatrice de diffusion. Un écart angulaire entre les positions théoriques et expérimentales de ces pics a néanmoins été observé. Il a été corrélé à une diminution de la densité électronique des couches superficielles en présence de rugosité, par rapport à un matériau massif (cas d'une surface idéale). Sur la base d'une hypothèse de transition graduelle de l'indice (de l'air vers le matériau) vérifiée expérimentalement, il a été proposé d'introduire la notion d'indice effectif n_e , obtenu à partir d'une moyenne pondérée des indices de l'air et du matériau massif (théorique), pour mieux approcher les mesures expérimentales. Ce travail a également permis de mettre en évidence une importante sous-estimation de la rugosité δ_{RMS} déterminée à partir de la seule composante diffuse. Une procédure de correction autosuffisante a été mise au point, sur la base des mesures de réflexions spéculaire (réflectivité).

Les DSP X ($\lambda = 0,1540$ nm) corrigées, obtenues pour quatre matériaux de différentes nature et rugosité, ont ensuite été comparées aux DSP optiques ($\lambda = 633$ nm) sur le domaine de fréquences spatiales commun. Les résultats ont montré un bon accord, notamment pour les échantillons les moins rugueux.

Enfin, la diffusion du rayonnement X a été appliquée à l'étude de surfaces en platine iridié (matériau de référence pour la métrologie des masses), réalisées par différentes techniques de polissage. Cette étude fait état de la complexité du polissage et de la nécessité de son optimisation pour obtenir un état de surface satisfaisant et reproductible. Il a également été démontré que des procédures de polissage différentes peuvent donner lieu à des écarts entre les états de surface aussi bien au niveau des quelques couches superficielles que des parties plus en profondeur. L'apport de la réflectométrie X s'avère alors très important puisqu'il permet en combinant trois modes d'analyse, de discriminer les effets de surface et de « volume ».

Matias RODRIGUES – Développement d'un bolomètre magnétique haute résolution en énergie pour la spectrométrie gamma appliquée à la détermination des intensités d'émission photonique – Université Paris XI – *Mesures et instrumentation physique* – 21 décembre 2007.

La détermination des intensités d'émission photoniques est réalisée aujourd'hui à l'aide de détecteurs conventionnels qui présentent plusieurs limitations, liées à leur principe de fonctionnement : résolution en énergie, niveau de fond Compton et difficulté à caractériser le rendement de détection. L'objectif de cette thèse était donc de développer un bolomètre magnétique, basé sur un principe physique permettant de contourner ces difficultés et donc à terme d'améliorer le niveau d'incertitude des mesures ainsi réalisées. Dans une première étape, les phénomènes de transfert d'énergie participant à la formation du signal ont été étudiés ; puis les paramètres du détecteur ont été simulés et la faisabilité de ces mesures a été validée par un premier prototype. Ce détecteur a ensuite été optimisé pour la mesure des intensités d'émission photoniques X et γ pour des énergies inférieures à 200 keV, avec une largeur à mi-hauteur inférieure à 100 eV et un rendement de détection intrinsèque d'environ 65 % à 100 keV. Le détecteur a pu être caractérisé sur plus de deux ordres de grandeur en énergie, à l'aide d'une source de ^{133}Ba . Les mesures réalisées, avec une incertitude évaluée à 3%, présentent un bon accord avec le résultat obtenu par simulation Monte Carlo. Il apparaît que le niveau du fond Compton du spectre en énergie est plus faible que celui obtenu avec un détecteur en germanium planaire, et ce bien que l'environnement de détection n'ait pas été spécifiquement optimisé sur ce point. Le bolomètre magnétique ainsi développé présente des performances comparables à celles d'un détecteur germanium planaire (résolution en énergie, rendement de détection intrinsèque et linéarité en énergie). Néanmoins, plusieurs axes d'améliorations potentielles sont à encore explorer dont une meilleure définition de l'angle solide de détection ainsi qu'une augmentation du taux de comptage du détecteur. Les performances en terme de résolution en énergie peuvent être améliorées de manière significative et le développement des bolomètres magnétiques est donc une technologie prometteuse pour des applications en métrologie des rayonnements ionisants.

Wassim KSOURI – Etude et réalisation des références dosimétriques nationales en termes de kerma dans l'air pour les faisceaux de rayons X de basses et moyennes énergies. – Université de Nice Sophia Antipolis – *Physique* – 5 décembre 2008.

Les progrès en radioprotection et radiothérapie, ainsi que les besoins accrus en termes d'exactitude, amènent les instituts nationaux de métrologie à améliorer la réalisation de leurs références. Dans le domaine des rayonnements ionisants, la référence métrologique est constituée par un

appareil de mesure absolue de la grandeur d'intérêt (dose absorbée dans l'eau ou kerma dans l'air). Cette thèse se propose d'établir les références dosimétriques, en termes de kerma dans l'air, pour les faisceaux X de basses et moyennes énergies. Cela permet ainsi au LNE-LNHB (Laboratoire national Henry Becquerel), de compléter la gamme de ses faisceaux de référence. Deux détecteurs étalons qui sont des chambres d'ionisation à parois d'air, WK06 pour les moyennes énergies et WK07 pour les basses énergies, ont été développés. Des calculs à l'aide de codes de simulation par méthode de Monte Carlo et des mesures expérimentales ont permis d'obtenir les facteurs de correction pour les détecteurs primaires. Les bilans des incertitudes types associées au kerma dans l'air ont été établis. Ces références dosimétriques ont été comparées à celles des laboratoires homologues et sont en accord en termes de degré d'équivalence.

LNE-SYRTE

Xavier BAILLARD – Horloge à réseau optique à atomes de strontium. – Université Paris VI – *Physique Quantique* – 22 janvier 2008.

Afin de surpasser les performances des meilleures horloges micro-ondes actuelles, les fontaines atomiques, les recherches de ces vingt dernières années se sont portées sur les horloges optiques. Utilisant des transitions à des fréquences de quatre ordres de grandeur plus importantes, l'exactitude et la stabilité de fréquence de ces horloges, par rapport aux fontaines atomiques, pourraient être améliorées d'un facteur cent. Néanmoins, les premières horloges optiques, utilisant soit des atomes neutres en chute libre soit un ion piégé, présentent des limites. Suite à une proposition datant de 2001, un nouveau type d'horloge est apparu, capable de combiner l'exactitude des meilleures horloges à ion ainsi que la très bonne stabilité des horloges à atomes neutres, grâce au piégeage des atomes dans un réseau optique. Ainsi, le LNE-SYRTE développe une horloge à réseau optique avec des atomes de strontium utilisant la transition $^1S_0 - ^3P_0$. Les résultats obtenus s'articulent selon trois axes. Le premier est l'évaluation des effets du piège sur l'exactitude de l'horloge. En effet, l'idée originale de ce nouveau type d'horloge est de pouvoir piéger les atomes à une longueur d'onde qui annule le déplacement lumineux du premier ordre de la fréquence de la transition. Il a été cependant nécessaire d'évaluer le niveau de cette annulation ainsi que les effets d'ordre plus élevé. Ensuite, les performances de l'horloge ont été évaluées en utilisant l'isotope fermionique ^{87}Sr , pour lequel ce type d'horloge avait initialement été imaginé. Une exactitude au niveau de 10^{-15} et une fréquence en excellent accord entre les différents groupes utilisant le même isotope ont été obtenues. Enfin, suite à de récentes propositions théoriques, une mesure originale a été effectuée avec l'isotope bosonique ^{88}Sr en adaptant le dispositif expérimental. Cette mesure a été la première pour cet isotope et a permis de comparer les deux fonctionnements de l'horloge.

Julien LE GOUET – Étude des performances d'un gravimètre atomique absolu : sensibilité limite et exactitude préliminaire. – Université Paris XI – *Optique et photonique* – 7 février 2008.

L'interférométrie atomique est appliquée à la mesure absolue de l'accélération de pesanteur, afin de fournir une mesure exacte de g à l'expérience de balance du watt réalisée au LNE. La source atomique est obtenue à partir d'un nuage d'atomes froids de rubidium 87. Deux faisceaux lasers contra-propageants verticaux sont utilisés pour réaliser des transitions Raman stimulées, qui permettent de séparer et faire interférer les paquets d'onde. Lors des transitions, la différence de phase entre les lasers est imprimée sur la phase des atomes en chute libre. Le déphasage atomique entre les deux chemins verticaux est alors sensible à l'accélération des atomes et permet d'accéder à une valeur exacte de g . Cette thèse est d'abord consacrée à l'étude des sources de bruit affectant la sensibilité de la mesure. Notamment, la contribution du bruit de phase dû à la propagation des lasers dans le schéma conventionnel de faisceaux Raman rétro-réfléchis est détaillée. Une partie importante du travail a ensuite consisté à étudier et réduire la contribution des vibrations, source principale de bruit de phase. A partir de la mesure d'un sismomètre, nous réduisons de près d'un facteur 3 la contribution des vibrations par deux méthodes différentes. On montre qu'un traitement numérique du signal délivré par un sismomètre permet de réduire encore ce bruit d'un facteur 3 quand l'expérience n'est pas isolée des vibrations du sol. La meilleure sensibilité mesurée, dans les conditions d'environnement optimales, est de $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ g/Hz}^{1/2}$. Par ailleurs, l'étude de l'exactitude de la mesure occupe une part importante de la thèse. Bien que l'enceinte à vide utilisée ne soit que provisoire, il a été entrepris de recenser des effets systématiques. Parmi les biais étudiés, on distingue ceux qui dépendent de l'orientation, vers le haut ou vers le bas, du vecteur d'onde effectif associé à la transition Raman. Une méthode de mesures différentielles est définie, ainsi que les limites de cette méthode. D'après deux comparaisons avec des gravimètres absolus basés sur une technique éprouvée d'interférométrie optique, la mesure effectuée présente un biais résiduel de $16 \cdot 10^{-9} \text{ g}$. Le montage actuel provisoire n'a cependant pas permis d'évaluer exactement l'effet Sagnac résiduel, ni l'effet des aberrations des faisceaux Raman.

François IMPENS – Contribution à l'optique des ondes atomiques cohérentes - Conception de dispositifs multi-ondes. – Ecole Polytechnique – *Physique* – 17 mars 2008.

Les atomes froids jouent un rôle primordial dans le développement d'horloges et de capteurs inertiels de haute exactitude. Ces expériences n'ont utilisé jusqu'alors que des nuages incohérents, mais l'avènement des lasers à atomes rend désormais possible l'utilisation de sources atomiques pleinement cohérentes dans de tels dispositifs. Les perspectives offertes par ces nouvelles sources sont étudiées au moyen de deux propositions expérimentales originales, impliquant en particulier des résonateurs à ondes de matière.

Frédéric CHAPELET – Fontaine atomique double de césium et de rubidium avec une exactitude de quelques 10^{-16} et applications. – Université Paris XI – *Physique* – 14 mai 2008.

Les fontaines atomiques constituent l'état de l'art en matière d'horloges atomiques fondées sur l'atome de césium, atome dont une résonance hyperfine est depuis 1967 à la base de la définition de la seconde. Cette thèse présente les dernières avancées de la fontaine double à atomes froids de césium et de rubidium du LNE-SYRTE. Combinant deux types d'atomes, ce dispositif unique au monde permet d'envisager des tests de physique fondamentale reposant sur la comparaison de fréquences de transition atomique avec une résolution exceptionnelle. Afin d'autoriser le fonctionnement à deux atomes simultanément, de nouveaux systèmes optiques, chargés de combiner les lumières utiles à la manipulation des deux espèces atomiques, ont été conçus, testés et mis en place. Sans attendre le fonctionnement double, la comparaison de la fontaine rubidium avec l'autre fontaine césium a permis de tester sur dix ans la stabilité de la constante de structure fine au niveau de $5 \cdot 10^{-16}$ par an. En outre, le travail d'amélioration de l'exactitude de l'horloge s'est poursuivi en concentrant les efforts sur les effets liés aux gradients de phase dans la cavité d'interrogation et sur l'atténuation des fuites micro-ondes. L'exactitude de la fontaine a alors été évaluée à $4 \cdot 10^{-16}$ pour la partie césium et à $5 \cdot 10^{-16}$ pour la partie rubidium complètement renouvelée. Instrument de métrologie puissant, la fontaine a été impliquée dans de nombreuses comparaisons d'horloges et a contribué à maintes reprises à l'étalonnage du Temps Atomique International (TAI). Enfin, un test inédit de l'invariance de Lorentz a été mené.

Alexandre GAUGUET – Gyromètre à atomes froids : étude de la stabilité limite et des effets systématiques liés aux séparatrices lasers. – Université Paris VI – *Lasers et matière* – 11 juin 2008.

Cette thèse présente l'étude d'un gyromètre à atomes froids fondé sur l'interférence de paquets d'onde atomiques, manipulés à l'aide de transitions Raman stimulées. L'amélioration du dispositif expérimental a permis d'atteindre des sensibilités sur une seconde de

$2,4 \cdot 10^{-7} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ et de $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ pour des mesures de rotation et d'accélération. Ainsi, les performances obtenues sont comparables à celles des meilleurs gyromètres à fibre optique. L'influence des déphasages induits lors des interactions Raman (déplacement lumineux, défauts de front d'onde des lasers) a été étudié en détail. En particulier, il a été montré que ces effets limitent la stabilité à long terme des mesures. Une étude de l'exactitude des mesures qui utilise la rotation de la Terre a été également réalisée.

Loïc DUCHAYNE – Transfert de temps de haute performance : le lien micro-onde de la mission ACES. – Observatoire de Paris – *Physique* – 23 octobre 2008.

Les méthodes de transfert de temps actuelles atteignent des performances telles que leur utilisation permet de tester les lois de la physique fondamentale. Dans ce cadre, la mission ACES vise, entre autres, l'étude des effets de la gravitation sur le battement des horloges à travers un lien de communication performant, le lien micro-onde. Cette thèse se focalise sur la comparaison des horloges de cette mission pour en développer un modèle précis au dixième de picoseconde. De ce modèle, découle un algorithme de traitement des mesures brutes qui servira lors de la mission. Des tests de ce programme ont été réalisés à l'aide d'une simulation des mesures de la mission afin d'évaluer les performances. Par ailleurs, les besoins de la mission en précision de l'orbitographie des stations et des calibrations temporelles de la mission sont approfondis et montrent de limites moins contraignantes que celles naïvement estimées. Enfin, la résolution statistique des ambiguïtés de phase est étudiée à l'aide d'un modèle réaliste de bruit des mesures. Ce travail conduit à des méthodes permettant de réduire considérablement le taux d'échec de cette détermination. Ce travail s'ouvre sur l'étude du projet SAGAS et de son concept avancé de lien optique. Des combinaisons de mesures et leur optimisation permettent d'évaluer les performances du projet sur plusieurs de ses objectifs scientifiques, tels que l'exploration spatiale, les tests des lois de la gravitation ou les ondes gravitationnelles.