

Thèses de doctorat en sciences soutenues en 2015

Ph.D. Theses presented in 2015

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 2015 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

Fabien LAFONT – *Quantum Hall effect in graphene for resistance metrology* – Université Paris Sud, Orsay – *Physique* – 9 avril 2015.

Les travaux ont été effectués sur l'étude de l'effet Hall quantique dans le graphène dans le cadre d'un projet de recherche en métrologie sur la réalisation d'étalons quantiques de résistance électrique.

L'effet Hall quantique (EHQ) apparaissant dans des gaz bi-dimensionnels d'électrons placés à basse température et sous fort champ magnétique a révolutionné la métrologie des résistances depuis sa découverte en 1980 par Klaus von Klitzing. Cet effet apporte une représentation de l'ohm uniquement fondé sur la constante de Planck et la charge de l'électron. Néanmoins sa mise en pratique dans des hétérostructures semi-conductrices requiert des conditions d'utilisation contraignantes, telles que le champ magnétique, la température et le courant électrique ($B = 10$ T, $T = 1,4$ K et $I = 40$ μ A), nécessitant l'utilisation de systèmes cryomagnétiques coûteux et d'une instrumentation de mesure particulière. Le graphène, par les phénomènes physiques particuliers apparaissant dans ce matériau, peut théoriquement mener à un étalon de résistance fonctionnant dans des conditions moins contraignantes, ouvrant la porte à une dissémination accrue de l'ohm.

Les travaux ont permis de traiter tout d'abord de l'impact particulier sur la quantification de la résistance de Hall des défauts linéaires, omniprésents dans le graphène crû par dépôt chimique en phase vapeur sur métal. Puis l'étude a été dédiée au graphène crû par dépôt chimique en phase vapeur sur carbure de silicium. L'équipe de recherche a pu montrer que la résistance de Hall dans ce matériau était quantifiée avec une incertitude relative de l'ordre de 10^{-9} dans des conditions de température et de champ magnétique bien plus avantageuses que celles d'un étalon semi-conducteur. Une étude des processus de dissipation apparaissant dans le graphène permet également de soulever des questions intéressantes sur le lien entre le type de désordre et la quantification de la résistance de Hall dans ce matériau.

Florentin RENGNEZ – Développement de comparateur cryogénique de courants très faible bruit pour la métrologie électrique quantique – Université de Paris Saclay – *Physique* – 30 novembre 2015.

Dans un contexte de besoin grandissant en précision dans la mesure des faibles courants pour les instituts nationaux de métrologie, l'industrie, les fabricants d'instruments et la physique fondamentale, l'étude des dispositifs à un électron (SET) capables de générer un courant continu directement proportionnel à une fréquence et la charge élémentaire, couplés à un amplificateur de courant très performant, le comparateur cryogénique de courant (CCC), devient pertinente pour réaliser un étalon

quantique de courant. Dans ce contexte, les travaux ont été poursuivis au LNE sur l'étude de nouveaux dispositifs SET et le développement de nouveaux CCC. Durant cette thèse, un montage expérimental a été mis en place afin d'évaluer les performances d'un nouveau CCC, constitué d'une conception originale et de 30 000 tours. Les résultats expérimentaux obtenus sont satisfaisant par rapport aux objectifs fixés, que ce soit en termes de résolution en courant, d'erreurs, de stabilité des mesures et de reproductibilité. Le CCC développé durant la thèse peut donc être utilisé pour quantifier de manière métrologique les dispositifs à un électron. De plus, une modélisation réalisée à partir d'un schéma électrique équivalent a été mis en place afin de simuler le comportement réel du CCC en prenant en compte les aspects magnétiques et électriques mis en jeu. Cette simulation a permis la quantification de l'erreur due aux fuites de courant au travers des capacités parasites entourant les enroulements. Les résultats de la simulation indiquent que cette erreur atteint 10^{-10} à la fréquence de travail, ce qui est inférieur de deux ordres de grandeurs à l'erreur maximale tolérable : 10^{-8} . Les résultats expérimentaux et ceux issus de modélisation fournissent de nouveaux éléments d'amélioration de la conception de CCC de grand gain. Enfin, la modélisation développée, une fois insérée dans une routine d'optimisation, pourra aussi être un outil de conception des CCC très utile.

LNE-IRSN

Donovan MAIRE – Développement d'une TPC pour les références en énergie et en fluence des champs neutroniques de basses énergies (de 8 keV à 5 MeV) – Université Grenoble Alpes – *Physique subatomique et Astroparticules* – 4 décembre 2015.

Afin de juger de la fiabilité des mesures, la métrologie nécessite de quantifier des grandeurs, avec leurs incertitudes, en les reliant à une référence par une chaîne ininterrompue et documentée de raccordements. Dans le domaine des rayonnements neutroniques, il est essentiel de connaître la réponse des instruments de mesure en fonction de l'énergie des neutrons. Des étalonnages sont donc réalisés auprès de champs neutroniques de référence. En France, les références primaires en termes de champs neutroniques sont détenues par le LNE-IRSN, au sein du Laboratoire de Métrologie et de Dosimétrie des Neutrons (LMDN).

Afin d'améliorer la caractérisation des champs neutroniques de référence, le détecteur LNE-IRSN MIMAC μ TPC a été développé. Ce détecteur est une chambre à projection temporelle (TPC), utilisant un gaz à basse pression (de 30 mbar à 1 bar, avec 1 bar = 10^5 Pa). Des noyaux de recul sont produits par diffusion élastique des neutrons sur les atomes du gaz. En mesurant l'énergie et l'angle de diffusion des noyaux de recul, le détecteur

μ TPC mesure la distribution en énergie de la fluence des neutrons entre 8 keV et 5 MeV.

Le défi majeur de cette thèse était de réaliser une spectrométrie fine des champs neutroniques autour de 1 keV, selon une procédure de mesure primaire. Une démarche métrologique a d'abord été entreprise afin de maîtriser l'ensemble des processus physiques intervenant dans la détection des neutrons par la μ TPC. Cela a conduit au développement d'un modèle direct et d'un modèle inverse représentant respectivement la fonction de réponse du détecteur et sa réciproque. Grâce à cette caractérisation détaillée, la distribution en énergie de la fluence a été mesurée pour un champ neutronique continu de 27 keV. L'énergie des neutrons reconstruite est $(28,2 \pm 4,5)$ keV, la mesure intégrale de la fluence est en accord avec d'autres méthodes de mesures à 6 % près. Le système LNE-IRSN MIMAC μ TPC devient le seul capable de mesurer conjointement l'énergie et la fluence à des énergies inférieures à 100 keV, de manière primaire. L'objectif de la thèse est donc atteint. Ces mesures à des énergies inférieures à 100 keV ont mis en exergue une non-linéarité de l'ionisation par rapport à l'énergie cinétique des ions. Au-delà de cette thèse, l'étude de cette non-linéarité fait écho aux questions actuelles en radiobiologie sur les mécanismes de dépôt de dose.

LNE-LCM

Kamélia BOUDERBALA – Mise en œuvre d'une régulation thermique sur une machine de mesure dimensionnelle de très haute exactitude – Utilisation d'un modèle d'ordre faible en boucle fermée – ENSMA, Poitiers – *Science pour l'Ingénieur* – 16 décembre 2015.

La thèse porte sur la modélisation et la régulation de la température au sein d'un dispositif expérimental développé initialement pour valider les principes de conception adoptés pour une nouvelle machine de mesure de cylindricité, au LNE. Le dispositif expérimental a été équipé de 19 sondes à résistance de platine, raccordées à une référence nationale, afin d'étudier l'influence des perturbations thermiques générées par des sources de chaleur internes et externes sur son comportement et sa stabilité. L'évaluation de l'influence de ces perturbations sur les mesures réalisées avec des capteurs de déplacement capacitifs a également été menée.

Les perturbations thermiques internes provoquées par les éléments de guidage mécaniques ont été simulées par trois films chauffants. Ensuite, une modélisation par éléments finis du dispositif expérimental a été réalisée, et les résultats numériques ont été comparés avec les résultats expérimentaux, obtenus en respectant les mêmes conditions. Les écarts obtenus, de l'ordre de 0,1 °C, sont trop élevés pour que ce modèle soit adopté pour l'élaboration d'une régulation thermique en temps réel. Dans la suite, un modèle réduit a été développé à partir des données expérimentales et en se basant sur la méthode

d'identification modale (MIM). Les résidus obtenus entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec les modèles réduits sont inférieurs à 0,003 °C. Finalement, une régulation thermique à mieux que le centième de degré Celsius a été implémentée en appliquant une commande prédictive associée à un filtre de Kalman.

Younes BOUKELLAL – Contribution à la mise en place d'un AFM métrologique : Développement d'une tête AFM métrologique et caractérisation métrologique de l'instrument – École normale supérieure de Cachan – *Électronique, Électrotechnique et Automatique* – 2 avril 2015.

Les microscopes en champ proche sont très largement utilisés pour caractériser des propriétés physiques à l'échelle du nanomètre. Afin d'assurer la cohérence et l'exactitude des mesures dimensionnelles qu'ils fournissent, ces microscopes ont besoin d'être étalonnés périodiquement. Le raccordement à la définition du mètre SI est assuré par le biais d'étalons de transfert dont les caractéristiques dimensionnelles sont étalonnées à l'aide d'un microscope à force atomique métrologique (mAFM).

Les travaux de thèse portent sur la contribution à la mise en place du Microscope à Force Atomique métrologique du LNE dans le but de caractériser et réduire l'incertitude de mesure. Une tête AFM passive thermiquement et spécifiquement conçue pour des applications de nanométrie dimensionnelle a été développée et intégrée au mAFM. Elle comporte un système original pour mesurer les déflexions du levier nécessaire à la détection des forces s'exerçant à l'extrémité de la pointe. Il utilise une évolution de la méthode du levier optique qui permet de déporter les sources de chaleurs à l'extérieur de l'instrument. Pour cela, un nouveau capteur a été développé. Il est basé sur l'utilisation d'un bundle composé de 40 000 microfibres optiques structurées en quatre quadrants. Il remplace avantageusement une photodiode quatre quadrants et permet de transporter le signal lumineux jusqu'à des photodiodes placées à l'extérieur de l'instrument. Ce système a été modélisé, caractérisé et validé expérimentalement. La tête AFM ainsi développée est thermiquement passive. Sa conception repose sur la dissociation complète de la chaîne métrologique, constituée en Zerodur, afin de lui conférer une excellente stabilité thermique et mécanique. Pour les mêmes raisons, le châssis de la tête qui supporte l'ensemble des composants et notamment le système de mesure des déflexions du levier est entièrement conçu en Invar. Cette tête repose sur une structure motorisée constituée de trois moteurs à reptation permettant l'approche de pointe mais également le réglage des interféromètres.

Après intégration de la tête dans le mAFM, l'ensemble de l'instrument a été caractérisé afin d'établir son bilan d'incertitude. Plusieurs composantes ont ainsi été évaluées expérimentalement comme la non-linéarité et la stabilité de la mesure de position par interférométrie, les rotations parasites du scanner, les erreurs d'Abbe, les défauts de

rugosité et de planéité des miroirs ainsi que les erreurs de bras mort. L'impact de chaque composante a été quantifié et listé dans le bilan d'incertitude. Ces travaux ont permis d'avoir une première estimation de l'incertitude de mesure du mAFM.

Jordi NONNE – Caractérisation de la qualité des éclairages artificiels (Rendu des couleurs et confort visuel) en particulier pour les sources de lumière à diodes électroluminescentes (DEL) – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Lasers, Nanosciences et Métrologie* – 15 décembre 2015.

La thèse a été réalisée dans le cadre du projet de recherche européen Euramet/EMRP ENG05 « Lighting », projet réunissant une quinzaine d'instituts nationaux de métrologie en Europe. L'apparition de nouvelles solutions d'éclairage utilisant des diodes à électroluminescence (DEL) n'apporte pas seulement une efficacité en termes de diminution de puissance consommée mais elles doivent également répondre à des critères de qualité de lumière pour l'utilisateur selon l'environnement.

L'étude s'est concentrée sur les problématiques du confort visuel ainsi que sur les indices du rendu des couleurs conformes à ceux de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) qui ne permettent pas de prédire une évaluation fiable en ce qui concerne ces nouveaux éclairages à l'état solide. L'étude s'est appuyée sur des calculs informatisés des métriques existantes, des résultats de plusieurs expériences subjectives réalisées dans un environnement contrôlé et reproductible et leurs caractérisations. Un premier modèle capable de prédire le confort visuel d'un scénario d'éclairage a été réalisé et décrit. Plusieurs axes d'amélioration des métriques du rendu des couleurs ont été étudiés.

L'ensemble des expériences intègre des solutions d'éclairages traditionnels. À l'aide de cartes de luminance, les résultats obtenus ont été comparés aux performances des sources respectives.

Shiraz OUARETS – Conception de la détection d'un gonioréfléctomètre métrologique pour mesurer la BRDF des surfaces – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Lasers, nanosciences et métrologie* – 3 juin 2015.

Le but de la thèse était de doter la métrologie française d'un instrument de référence dédié à la caractérisation métrologique des propriétés réfléchives des objets qui, du point de vue de l'apparence, sont à l'origine des sensations de couleur, de brillant, de texture, de translucidité, etc. Il s'agissait de concevoir, réaliser et mettre au point un dispositif de mesure de la fonction de distribution bidirectionnelle du coefficient de luminance d'une surface plane (BRDF). La BRDF est la grandeur physique qui caractérise intégralement la réflexion lumineuse à la surface d'un matériau. En cela, sa mesure s'inscrit comme un outil indispensable pour la mesure de l'apparence car elle permet de connaître en détail le signal qui entre dans

l'œil. Certaines surfaces présentent une apparence pigmentée, métallisée, nacrée ou encore interférentielle, ces surfaces, dites « goniochromatiques », ont la capacité de changer d'apparence en fonction de l'angle d'observation. Pour les caractériser, il est impératif d'effectuer une mesure de BRDF sous plusieurs conditions d'observation et d'illumination. L'outil de mesure de la BRDF est un goniorélectromètre, dédié à des mesures dans le domaine spectral UV – Visible (250 nm – 900 nm). Le montage expérimental consiste en deux lignes distinctes. La première, appelée voie spectrale, est dédiée à l'étude de la couleur. Elle est constituée d'une illumination fixe, assurée par une lampe à décharge de xénon filtrée par un monochromateur puis focalisée sur la surface étudiée. La détection mobile, est assurée par un système optique constitué de lentilles et de miroirs qui servent à renvoyer la lumière réfléchie par la surface sur la photodiode. La deuxième ligne, appelée voie spatiale, est dédiée à l'étude du brillant. Elle requiert une résolution angulaire qui égale l'acuité visuelle de l'œil humain ($0,03^\circ$); cette partie apporte toute l'originalité de l'instrument. Sur cette voie, la détection est fixe et est basée sur la combinaison d'une optique de Fourier et d'une caméra CCD (512×512 pixels). L'illumination est mobile et est assurée par une lampe incandescente à filament de tungstène collimatée sur l'échantillon. Les deux lignes partagent un robot porte-échantillon qui offre six degrés de liberté et qui sert à reproduire toutes les directions d'illumination et d'observation au-dessus de l'échantillon.

Achour SADOUNI – Réalisation et caractérisation métrologique d'un pyromètre accordable – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Lasers, nanosciences et métrologie* – 11 décembre 2015.

Cette thèse de doctorat traite de la réalisation et de la caractérisation métrologique d'un pyromètre à filtre accordable acousto-optique (AOTF). La première partie expérimentale de ce travail a été consacrée à l'étude du fonctionnement et de la caractérisation de l'AOTF, la seconde partie a été dédiée au développement et à l'optimisation du pyromètre accordable.

Contrairement aux pyromètres les plus couramment répandus, dont la sélection spectrale est obtenue par un filtre interférentiel, le pyromètre accordable développé utilise un filtre acousto-optique qui présente la particularité d'être adapté à un étalonnage par laser. La longueur d'onde optique de mesure comprise entre 650 nm et 950 nm est imposée par la fréquence de l'onde radiofréquence appliquée au filtre acousto-optique.

Le niveau de diffusion optique du pyromètre est de l'ordre de 10^{-5} en valeur relative. La reproductibilité de sa sensibilité spectrale en longueur d'onde, mesurée sur une semaine, est de 0,01 nm et 0,1 % en amplitude. Ces caractéristiques, comparables à celles des meilleurs monochromateurs, permettent l'utilisation du pyromètre accordable pour des applications métrologiques au meilleur niveau d'exactitude (0,1 K). L'instrument est

transportable car ses dimensions sont compactes (90 cm × 20 cm × 30 cm).

Les performances et la caractérisation métrologique du pyromètre ont été validées par la mesure de la température thermodynamique du point de congélation du cuivre, en accord avec celle donnée dans l'EIT-90 (1 357,77 K).

Matthieu THOMAS – Détermination de la constante de Planck au moyen d'une balance du watt – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Lasers, nanosciences et métrologie* – 5 juin 2015.

Dans l'optique d'une modification du SI fondée sur la valeur de constantes fondamentales de la physique, le LCM-LNE/Cnam a développé une expérience de balance du watt, de manière à participer à la redéfinition de l'unité de masse : le kilogramme. Cette unité est en effet la dernière des unités de base du SI qui repose encore sur un artefact matériel : le prototype international du kilogramme.

Une bobine, plongée dans un flux magnétique est le cœur du dispositif de la balance du watt. Elle permet la comparaison d'une puissance électrique et d'une puissance mécanique virtuelles. La détermination des grandeurs électriques par comparaison à l'effet Josephson et à l'effet Hall quantique permet alors d'établir une relation entre une masse macroscopique et la constante de Planck.

Après une dizaine d'années de développements séparés des différents éléments, de très nombreuses caractérisations et améliorations, les premiers travaux de cette thèse ont consisté en l'assemblage des sous-ensembles de la balance du watt. L'équipe s'est ensuite intéressée à l'évaluation des composantes principales d'incertitudes, en particulier à celles qui concernent les problématiques d'alignement : alignement sur la verticale des faisceaux lasers des interféromètres mesurant la vitesse de la bobine, alignement sur l'horizontale des pivots du comparateur de forces ; enfin à l'évaluation des forces de Laplace horizontales et des moments parasites s'exerçant sur la bobine et à leurs influences sur la détermination de la constante de Planck.

Une valeur de la constante de Planck, h , a été déterminée à l'été 2014 : $6,626\ 068\ 8(20) \times 10^{-34}$ J.s. Cette évaluation a été réalisée avec l'incertitude type relative de $3,1 \times 10^{-7}$. Des propositions pour améliorer cette incertitude sont avancées.

LNE-LNHB

Benôit SABOT – Étalonnage des instruments de mesure de l'activité volumique du thoron (^{220}Rn) dans l'air – Université de Paris Sud et Paris-Saclay – *Imagerie Médicale et Radioactivité* – 25 novembre 2015.

L'objectif de cette thèse est de développer un système étalon de thoron afin de raccorder les instruments de

mesure de l'activité volumique du thoron (^{220}Rn) dans l'air. Le dispositif de mesure conçu est un volume composé d'un détecteur semi-conducteur silicium couplé à un champ électrique permettant la capture des descendants solides chargés du thoron à la surface du détecteur. Des simulations avec un code déterministe ont permis d'optimiser la forme et les dimensions du dispositif pour obtenir un champ électrique efficace pour la capture de ces descendants malgré un débit de circulation rapide à l'intérieur du volume de mesure. Des calculs Monte-Carlo ont aussi permis de définir le rendement de détection du dispositif, ainsi que la forme du spectre alpha.

Les rendements de détection calculés pour la mesure du ^{222}Rn et ^{220}Rn ont été validés expérimentalement avec une atmosphère étalon de radon (^{222}Rn) produite à l'aide d'un banc de dilution conçu spécifiquement pour cette mesure. Une étude de sensibilité a montré que la réponse du dispositif est indépendante de la pression, de l'humidité et du débit de prélèvement dans la gamme de mesure considérée. L'analyse des spectres alpha obtenus a permis de qualifier précisément l'activité volumique d'une atmosphère en thoron avec une incertitude-type associée de 1 %. Le dispositif, portable, a été transporté au laboratoire de métrologie de l'activité italien pour réaliser des comparaisons avec leur dispositif en développement. Les résultats sont compatibles en tenant compte des incertitudes associées.

LNE-SYRTE

Anthony BERCY – Liens ultra-stables par fibres optiques : déploiement vers plusieurs utilisateurs distants, étude des limites fondamentales et technologiques et nouvelles applications – Université Paris 13 – *Optique* – 14 décembre 2015.

Les liens optiques permettent de disséminer une fréquence de référence ultrastable à de nombreux laboratoires de recherche pour des mesures de très haute précision. L'auteur a démontré premièrement une extraction simple d'un signal ultrastable en différents points d'une liaison optique urbaine de 92 km, avec une stabilité de fréquence relative à 1 s de $1,3 \times 10^{-15}$ et sensiblement dégradée sur le long terme par les effets thermiques diurnes. Il a développé et testé un deuxième dispositif amélioré avec un montage interférométrique compact et activement régulé en température et une diode laser permettant de disséminer le signal vers un lien secondaire dont le bruit est activement compensé. Ces deux dispositifs permettront de disséminer le signal à de multiples utilisateurs en région parisienne et sur le réseau REFIMEVE+.

Il a deuxièmement évalué les performances d'une méthode de type « deux voies » pour la comparaison de deux références de fréquence par fibre optique. L'équipe a testé la sensibilité de cette comparaison sur une boucle fibrée de télécommunication de 100 km en propagation

unidirectionnelle puis bidirectionnelle, avec une excellente stabilité de la fréquence grâce à une très bonne réjection du bruit de la fibre.

Ces résultats ouvrent la voie à la réalisation d'un réseau métrologique à l'échelle nationale et internationale pour la dissémination des meilleures horloges optiques.

Indranil DUTTA – *Stability Improvement of a Sagnac Cold Atom Interferometer: towards Continuous Operation* – Université Pierre et Marie Curie, Paris – *Physique Quantique* – 20 décembre 2015.

Cette thèse a pour objet de repousser les performances d'un interféromètre à atomes froids principalement sensible aux rotations selon un axe particulier. Des atomes de césium sont refroidis par laser, piégés et lancés verticalement selon une configuration en fontaine. La sensibilité du gyromètre repose sur l'effet Sagnac et est proportionnelle à l'aire physique qu'entourent les deux bras de l'interféromètre. L'auteur utilise des transitions Raman stimulées pour séparer les ondes atomiques et former une géométrie d'interféromètre de type Mach-Zehnder replié. Avec un temps d'interrogation de 800 ms, il est parvenu à une aire physique de 11 cm^2 . Des améliorations ont été apportées au dispositif expérimental pour faire fonctionner le gyromètre avec une telle aire Sagnac. Une procédure d'alignement relatif des faisceaux Raman, à $1 \mu\text{rad}$ près, a été élaborée et est particulièrement importante pour permettre aux ondes de matière d'interférer. Durant la thèse, la caractérisation des bruits de vibration impactant la sensibilité du gyromètre, ainsi que sa réjection, a été effectuée. Les travaux ont permis de démontrer une sensibilité de $160 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1}$ à 1 s, et une stabilité à long terme de $1,8 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1}$ après 10 000 s d'intégration. Ce niveau de stabilité représente une amélioration d'un facteur 5 par rapport à la précédente expérience de gyromètre du LNE-SYRTE de 2009, et d'un facteur 15 par rapport aux autres résultats publiés. Cette thèse a également permis de développer une nouvelle méthode d'interrogation des atomes pour opérer le gyromètre sans temps morts, un aspect important pour diverses applications des capteurs à atomes froids en navigation inertielle, en géophysique et en physique fondamentale.

Ramon SZMUK – *Atom chips for metrology* – Université Pierre et Marie Curie, Paris – *Physique Quantique* – 20 janvier 2015.

Cette thèse porte sur deux sujets principaux : l'évaluation de la stabilité d'une horloge sur microcircuit utilisant des atomes piégés (*Trapped Atom Clock on a Chip* - TACC) et l'extension de cette technologie vers la réalisation d'un interféromètre atomique sur la même puce. Cette combinaison constitue la base pour la réalisation de capteurs inertiels intégrés pour la navigation. Des travaux antérieurs ont installé l'horloge et ont découvert, entre autres, des temps de cohérence très

longs, qui permettent une interrogation Ramsey jusqu'à 5 s, une condition préalable pour le fonctionnement de grande stabilité.

L'auteur présente ici la première évaluation approfondie de la stabilité de l'horloge. Avec son prédécesseur, ils ont démontré des fluctuations de fréquences relatives de $5,8 \times 10^{-13}$ à 1 s intégrant jusqu'à 6×10^{-15} à 30 000 s.

La deuxième partie de la thèse vise à étendre la polyvalence de la puce atomique pour créer un interféromètre. L'auteur a étudié divers régimes d'interféromètres en utilisant des potentiels habillés par microondes. Le premier régime consiste à déplacer l'un des états d'horloge verticalement pendant une séquence d'horloge Ramsey. Ceci permet la mesure de gradients de potentiel en exploitant la différence de fréquences entre les deux états. Le second régime utilise des champs microondes pour générer un potentiel de double puits dans l'un des états d'horloge et un seul puits dans l'autre. À partir du seul puits, un pulse- π sur la transition d'horloge constitue la séparatrice de l'interféromètre et conduit une séparation spatiale tout en préservant le même état interne pour les deux bras de l'interféromètre.

Rinat TYUMENEV – *Mercury lattice clock: from the Lamb-Dicke spectroscopy to stable clock* – Université Pierre et Marie Curie, Paris – *Physique Quantique* – 23 juillet 2015.

Les deux premiers chapitres de la thèse présentent le principe d'un étalon de fréquence optique et les applications qui en découlent. Les principaux avantages métrologiques de l'horloge à réseau optique de mercure sont mis en avant, et quelques rappels théoriques d'interaction matière-rayonnement appliquée à la métrologie des fréquences sont effectués. Le montage expérimental est décrit de manière générale dans le chapitre 3, en insistant particulièrement sur les différentes sources laser utilisées. Les améliorations apportées au montage durant la thèse, font l'objet du chapitre 4. La première amélioration concerne le laser de refroidissement à 254 nm. Ces travaux de thèse ont permis d'augmenter le temps d'interrogation des atomes, étape nécessaire pour une nouvelle mesure de stabilité de l'horloge et la caractérisation des effets systématiques. Afin d'augmenter ultérieurement la stabilité, une refonte de la cavité optique qui piège les atomes dans le réseau s'est révélée indispensable. La nouvelle cavité permet de capturer 10 fois plus d'atomes grâce à une profondeur de piégeage accrue d'un facteur 3, influant directement sur le rapport signal sur bruit. Enfin, les résultats expérimentaux obtenus sont décrits dans le 5^e et dernier chapitre. La spectroscopie sur fond noir d'un échantillon de mercure polarisé en spin avec une largeur de raie record de 3,3 Hz a permis de mesurer une stabilité de $1,2 \times 10^{-15}$ à une seconde, soit meilleur de presque un facteur 5 par rapport à la précédente mesure. Une caractérisation de plusieurs effets systématiques sur les transitions d'horloge (déplacement

collisionnel, effet Zeeman ou encore effet de la lumière de piégeage) a été menée au niveau de 10^{-16} .

LNE-LTFB

Loïc BRAUN – Composants à ondes élastiques de surface pour le filtrage à gabarits maîtrisés aux fréquences radios pour applications spatiales et professionnelles – Université de Franche-Comté, Besançon – *Science physique pour l'ingénieur* – 6 juillet 2015.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse traitent de l'étude et de la réalisation de composants à ondes élastiques de surface (SAW) pour des applications de filtrage dans les gammes VHF et UHF.

L'auteur a étudié différentes structures de ces filtres, à commencer par des filtres à couplage acoustique longitudinal centrés aux alentours de 1 GHz, de bande passante relative inférieure à 0,1 % réalisés sur du quartz. Leur fabrication et leur caractérisation ont révélé des pertes d'insertion inférieures à 5 dB et des niveaux de rejet supérieurs à 20 dB, conformément aux prévisions du modèle de matrice mixte. Un tel filtre a été inséré dans un oscillateur pour valider la fonction réalisée.

Pour une maîtrise accrue de la conception de ces filtres, il a été développé un modèle tenant compte de la contribution des modes transverses sur leur fonction de transfert. Des comparaisons entre théorie et expérience ont permis de démontrer la précision de ce modèle.

L'auteur s'est également intéressé à des structures de filtres à éléments d'impédance et à transducteurs en éventails (*fan-shaped*) pour la réalisation de bandes passantes relatives comprises entre 1 % et 15 % dans la bande 100 MHz à 300 MHz. Pour chacune de ces structures, il a développé un modèle permettant d'étudier le comportement. Une configuration de filtre en treillis de bande passante relative proche de 2 % a été fabriquée et caractérisée, ainsi que plusieurs filtres à transducteurs en éventails de bandes passantes relatives supérieures à 10 %.

Enfin, il a été étudié deux approches qui ont permis de réaliser des dispositifs fonctionnant à des fréquences voisines de 3 GHz. La première, consiste à exploiter les vitesses de phase supérieures à $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ d'un guide d'ondes à base de carbone-diamant. La seconde exploite la résolution d'un procédé de lithographie par nano-impression pour réduire la période des réseaux d'électrodes.

Fabien HENROT – Composants à hauts facteurs de forme pour les résonateurs acousto-électriques et les dispositifs électro-optiques sur substrats mono-cristallins – Université de Franche-Comté, Besançon – *Science physique pour l'ingénieur* – 31 mars 2015.

La miniaturisation est l'objectif actuel de tous les fabricants de composants radiofréquences depuis plusieurs

décennies. Si les composants actifs pour la microélectronique sont fondés sur la structuration de plaques de silicium, les composants passifs reposent sur l'utilisation de cristaux tels que le quartz ou le niobate de lithium. Ce dernier est particulièrement utilisé quand il s'agit de générer et exploiter des ondes élastiques, ainsi que pour le guidage de faisceaux lumineux afin de réaliser des filtres ou des capteurs sensibles à différents paramètres environnementaux. L'amélioration du guidage de ces ondes permet un gain en consommation et en compacité des dispositifs mais nécessite une structuration de la matière souvent tridimensionnelle. Cette étape technologique clé est industriellement mature pour la mise en forme du silicium, mais s'avère difficilement transposable à des matériaux tels que le quartz ou le niobate de lithium.

Les travaux présentés dans ce manuscrit visent à réaliser des structures tridimensionnelles à hauts facteurs de forme dans des matériaux monocristallins à l'aide d'une scie circulaire de précision. Des structures utilisant l'inversion périodique de domaine ferroélectrique seront réalisées afin de les utiliser pour y guider des ondes élastiques possédant des couplages électromécaniques particulièrement élevées. Le guidage d'ondes optiques par le biais de ces mêmes structures permet une amélioration du confinement par rapport aux systèmes de guidage massifs classiques couramment utilisés pour la réalisation de filtre ou de modulateur électro-optiques. En utilisant conjointement le guidage d'ondes optiques et les domaines ferroélectriques alternés, les structures ainsi découpées permettent l'apparition de phénomènes optiques non-linéaires exaltés par l'amélioration du confinement. Ces structures ont ainsi montré leur intérêt dans plusieurs domaines de la physique avec un champ applicatif particulièrement vaste.

Eric KROEMER – Étude du déplacement collisionnel de la fréquence d'horloge du césium en présence du gaz tampon hélium ou xénon. Applications pour microcellules à haute température – Université de Franche-Comté, Besançon – *Spécialité Science physique pour l'ingénieur* – 8 juillet 2015.

Le cœur des horloges atomiques sur la base du phénomène de piégeage cohérent de population (CPT) est constitué d'une cellule renfermant de la vapeur alcaline, ici du césium. Dans cet espace confiné, les atomes alcalins viennent percuter les parois de la cellule et la cohérence CPT est détruite.

Pour pallier ce problème, un gaz ou un mélange de gaz tampon est introduit dans la cellule. Le gaz tampon va rendre le mouvement des atomes alcalins diffusif, et non plus balistique, et ainsi augmenter leur temps de vol. Ceci a pour effet de réduire considérablement la largeur de la cohérence CPT par effet Dicke, la ramenant de plusieurs centaines de kilohertz à quelques kilohertz ! Néanmoins, la présence de gaz tampon induit un déplacement quadratique de la fréquence d'horloge des atomes alcalins en fonction de la température de la cellule. Ce

déplacement collisionnel de fréquence est caractérisé par trois coefficients β , δ et γ . Le caractère quadratique du déplacement de fréquence implique un optimum en température où la sensibilité thermique est annulée au premier ordre. Cette température, dite d'inversion, est propre à chaque gaz tampon. Il est possible d'obtenir une température d'inversion particulière en introduisant un mélange de gaz. Dans ce cas, la température d'inversion dépend du rapport des pressions partielles entre les deux espèces de gaz tampon ! Cette température d'inversion est un point de fonctionnement de choix pour les horloges atomiques miniatures. La micro-horloge MAC-TFC contient du néon comme gaz tampon. Ce gaz présente une température d'inversion autour de 80 °C mais celle-ci n'est pas suffisante pour des applications à contraintes environnementales sévères où des températures de l'ordre de 90 °C à 100 °C sont préférables.

Ce travail de thèse se focalise principalement sur l'étude de nouveaux gaz tampon autorisant des températures d'inversion supérieures à 80 °C. Pour cela, les coefficients de déplacement collisionnel de divers gaz tampon ont été répertoriés dans la littérature. Ces coefficients sont relativement mal connus voire inconnus dans le cas du césium. Néanmoins, l'auteur a pu dégager de ces données deux candidats potentiels : l'hélium et le xénon. Il a également mené une étude sur la dépendance thermique du déplacement et de l'élargissement des transitions optiques du césium en présence d'hélium ou de xénon.

L'auteur a mesuré une première estimation des coefficients de déplacement collisionnel dans des cellules de taille centimétrique : $\beta_{\text{He}} = (1\,233 \pm 32) \text{ Hz/Torr}$, $\delta_{\text{He}} = (2,01 \pm 0,12) \text{ Hz/(Torr}\cdot\text{K)}$ et $\gamma_{\text{He}} = (-7,51 \pm 0,44) \text{ mHz/(Torr}\cdot\text{K}^2)$, où $1 \text{ Torr} \approx 133,322 \text{ Pa}$. Ces coefficients révèlent qu'un mélange néon-hélium, avec un faible pourcentage d'hélium, autoriserait une température d'inversion supérieure à 80 °C. Pour valider ce mélange de gaz tampon, il a été fabriqué des microcellules à vapeur de césium remplies avec un mélange néon-hélium qui ont ensuite été mesurées avec des températures d'inversion de l'ordre de 89 °C à 94 °C.

Meddy VANOTTI – Développement d'un système de détection en milieux gazeux d'espèces à risque pour le contrôle environnemental (application au monoxyde de carbone et à l'hydrogène). Composants et systèmes micro-acoustiques – Université de Franche-Comté, Besançon – *Science physique pour l'ingénieur* – 6 mai 2015.

La détection de gaz potentiellement dangereux représente une problématique d'actualité pour la protection des personnes mais aussi un enjeu d'avenir pour le stockage des énergies renouvelables. Les outils de simulations développés au sein du Département Temps-Fréquence de l'Institut FEMTO-ST, associés aux outils technologiques proposés par la centrale MIMENTO ont permis la mise au point de capteurs SAW apportant des réponses à ces problématiques. Ces derniers, fondés sur les propriétés des ondes de Love, ont ainsi permis la

détection du monoxyde de carbone dans la gamme d'une partie par million. De même, la mesure de concentration d'hydrogène de l'ordre de un pour cent a pu être réalisée par le biais de dispositifs s'appuyant sur les ondes Rayleigh.

Les efforts fournis pour l'optimisation des dispositifs électro-acoustiques ont aboutis à la réalisation de lignes à retard sur du quartz affichant des pertes d'insertion de 16 dB. La limitation de ces pertes, généralement de l'ordre de 25 dB à 30 dB sur du quartz, augmente les potentialités de ces capteurs en termes d'autonomie et de fonctionnalisation de surface. La connaissance des phénomènes physiques gouvernant leur fonctionnement représente la base de leur développement futur. De cette idée découle notre démarche d'identification et de compréhension de ces derniers par le biais des différentes

techniques de caractérisations et d'analyses disponible au sein de notre l'institut. Des pistes, telles que le recours à un alliage métallique pour la fonctionnalisation des surfaces sensibles et la mise en œuvre d'une méthode de séparation des puces limitant les perturbations du signal direct des dispositifs électro-acoustiques, ont été explorées et ont permis d'améliorer la réponse des capteurs. Le potentiel des composants à ondes élastiques guidée pour la détection de grandeurs chimiques en phase gazeuse a pu être établie sur la base des résultats expérimentaux obtenus au cours de cette thèse.

Dans la continuité de cette dernière, deux projets de recherche (P-AIR et SMARTY), visant le contrôle de la qualité de l'air en milieu urbain, ont d'ores et déjà été engagés.