

Thèses de doctorat en sciences soutenues en 2014

Ph.D. Theses presented in 2014

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 2014 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. À la suite des thèses, sont également reportés les thèmes de recherche qui ont fait l'objet d'une soutenance en 2014 pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR) par des chercheurs du réseau de la métrologie française.

LNE

Alexandra DELVALLÉE – Métrologie dimensionnelle de nanoparticules mesurées par AFM et par MEB – ENSTA-ParisTech – *Chimie* – 17 décembre 2014.

L'essor des nanotechnologies nécessitent le développement de moyens de caractérisation fiables pour répondre aux attentes sociétales (évaluation des risques potentiels) et industrielles (contrôle de fabrication). Dans le cas des nanoparticules, différents paramètres doivent être caractérisés, notamment pour répondre aux demandes de la réglementation (Arrêté du 6 août 2012 relatif au contenu et aux conditions de présentation de la déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire) mais la mesure de leur taille et des distributions granulométriques associées constituent les deux aspects les plus critiques. De nombreuses questions se posent cependant encore quant à la comparabilité des résultats obtenus pour la mesure de ces paramètres, du fait de l'absence d'une traçabilité métrologique établie et d'une évaluation rigoureuse des incertitudes de mesure. Cela a pour conséquence directe d'entretenir le flou sur l'applicabilité réelle des réglementations en cours ou à venir.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse contribuent à répondre à ces manques en proposant une approche originale basée sur l'étude de la complémentarité de la

microscopie à force atomique (AFM) et de la microscopie électronique à balayage (MEB) pour fournir une mesure traçable 3D d'un nano-objet.

Des méthodes de mesure de la taille de nanoparticules sphériques ont ainsi été mises au point et validées pour les deux instruments. Une technique de dépôt, mettant en œuvre une tournette, adaptée à ces deux techniques d'imagerie a par ailleurs été spécifiquement développée. Un bilan d'incertitude complet associé à la mesure de la taille de nanoparticules par AFM est présenté et les principales sources d'incertitudes liées à la mesure par MEB sont données. Un logiciel de traitement des images acquises par AFM et par MEB a également été conçu pour fournir une distribution granulométrique fiable d'une population donnée de nanoparticules et ses performances comparées aux solutions logicielles déjà présentes sur le marché. Enfin, des comparaisons de mesures de tailles de nanoparticules sphériques par AFM et par MEB ont été réalisées et permettent de valider le principe de mesure en trois dimensions de la taille de nanoparticules par la combinaison des deux méthodes de mesures.

Oumy NDIAYE-TANDIA – Caractérisation électromagnétique de nouveaux matériaux pour des applications industrielles aux fréquences micro-ondes – Université de Lille 1 – *Micro- et nanotechnologies, télécommunications* – 4 décembre 2014.

Les travaux de thèse ont été menés dans le cadre d'un projet de recherche européen « *Electromagnetic Characterization of new Materials for Industrial Applications up to microwave frequencies* » (EMINDA). Il avait pour objectif principal de développer une traçabilité électromagnétique de matériaux fonctionnels afin de permettre l'usage de ces matériaux dans les industries européennes plus particulièrement dans le domaine de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication.

Le projet visait, dans un premier temps, à développer des techniques de caractérisation électromagnétiques des matériaux à l'échelle submicrométrique aux fréquences micro-ondes (jusqu'à 110 GHz), puis à élargir la traçabilité métrologique de ces matériaux avec l'évaluation des incertitudes de mesure.

Durant cette thèse, une technique de caractérisation électromagnétique a été développée pour des matériaux ferroélectriques en couches minces (BST et PZT) à partir d'une topologie CPW (*CoPlanar Waveguide*) pour en déterminer leurs propriétés électromagnétiques (conductivité, permittivité, perméabilité...). La topologie CPW a été privilégiée dans la réalisation des mesures hyperfréquences car elle est compatible avec les exigences métrologiques de traçabilité des mesures aux unités du SI. Des mesures comparatives ont été réalisées entre les laboratoires nationaux de métrologie en utilisant des techniques expérimentales différentes. Ces travaux constituent au final, au niveau européen, une base de mesures des propriétés électromagnétiques de matériaux émergents dans l'industrie (matériaux, capteurs, électronique, télécommunications, énergies renouvelables, automobile, aérospatiale, etc.), avec une grande précision sur les incertitudes pour des mesures allant jusqu'à 110 GHz.

LNE-LCM

Nadim EL HAYEK – Contribution à la reconstruction de surfaces complexes à partir d'un grand flot de données non organisées pour la métrologie 3D – École Nationale des Arts et Métiers de Lille – *Mécanique et Matériaux* – 18 décembre 2014.

Les surfaces complexes ont des applications dans divers domaines tels que la photonique, l'énergie, le biomédical ou le transport... Par contre, elles posent de véritables défis quant à leur spécification, fabrication et mesure ainsi que lors de l'évaluation de leur défaut de forme. Les processus de fabrication et de mesure de surfaces complexes sont fortement tributaires des dimensions, des tolérances et des formes spécifiées. Afin de rendre exploitable les informations données par le système de mesure, une étape importante de traitement s'impose. Il s'agit ici de la reconstruction de surfaces afin de reconstituer la géométrie et la topologie de la surface sous-jacente et d'en extraire les informations nécessaires

pour des besoins de métrologie dimensionnelle. Dans la catégorie des surfaces asphériques pour lesquelles un modèle mathématique est associé, le processus de traitement de données géométriques, non nécessairement organisées, se fait par l'association du modèle aux données. Les résidus d'association recherchés en optique sont typiquement de l'ordre du nanomètre. Dans ce cadre, cette thèse propose l'utilisation de l'algorithme L-BFGS qui n'a encore jamais été utilisé en métrologie. Ce dernier permet de résoudre des problèmes d'optimisation non-linéaires, sans contraintes d'une manière robuste, automatique et rapide. La méthode L-BFGS reste efficace pour des données à plusieurs millions de points. Dans la catégorie des surfaces gauches et notamment des aubes de turbines, la fabrication, la mesure et le traitement sont à une toute autre échelle, submicrométrique. Les surfaces gauches ne sont généralement pas définies par un modèle mathématique mais sont représentées par des modèles paramétriques de type B-Spline et/ou NURBS. Dans ce cadre, un état de l'art détaillé est exposé et une nouvelle approche itérative d'association B-Spline est proposée. L'algorithme s'affranchit de tous les problèmes liés à l'initialisation et au paramétrage initial. Par conséquent, un tel algorithme constitue une nouveauté dans ce domaine. Une étude approfondie est établie en évoquant les avantages et les limites actuelles de cette approche sur des exemples de courbes fermées en 2D. Enfin, cette étude est complétée par des perspectives d'amélioration et de généralisation aux surfaces en 3D.

Refat RAZOUK – Mise en place de références métrologiques en enthalpie de fusion entre 23 °C et 1 000 °C – Conservatoire National des Arts et Métiers – *Laser, Métrologie, Communication* – 12 mai 2014.

Les techniques d'analyse thermique et de calorimétrie sont des méthodes d'essai largement utilisées dans les laboratoires d'analyse physico-chimique, pour des finalités de recherche ou de contrôle qualité. Comme tout appareil de mesure, un analyseur thermique ou un calorimètre doit être étalonné en température et en énergie avec des matériaux de référence certifiés. Les matériaux de référence recommandés correspondent généralement aux points fixes de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90), à savoir gallium, indium, étain, zinc et aluminium. Il existe peu de matériaux de référence certifiés au-dessus de 420 °C, alors que certains analyseurs thermiques peuvent être utilisés jusqu'à 1 000 °C, voire au-delà.

L'élaboration et la certification de matériaux de référence doivent employer des méthodes de mesure très précises avec un raccordement métrologique des mesures au Système international d'unités (SI). Le laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam (LCM) s'est engagé dans le développement d'un moyen de référence métrologique en calorimétrie permettant des mesures précises en enthalpie de fusion et en capacité thermique massique sur la plage de température [23 °C, 1 000 °C].

La solution métrologique retenue a été de modifier un calorimètre de type Calvet, et de mettre au point des procédures d'étalonnage et de mesure afin d'atteindre des incertitudes de mesures suffisamment faibles pour la certification des matériaux de référence. Dans ce travail, un système d'étalonnage fonctionnant à haute température a été spécifiquement conçu et intégré dans le calorimètre pour permettre l'étalonnage par substitution électrique. Ce système permet de réaliser successivement des étalonnages par effet Joule et des mesures d'enthalpie de fusion, sans modification des conditions expérimentales.

Ce travail comprend également le développement des systèmes d'acquisition et traitement des résultats des mesures. La détermination de l'enthalpie de fusion de plusieurs métaux (indium, étain et argent notamment) avec une recherche des facteurs d'influence sur cette grandeur, et une estimation des incertitudes de mesure. La mesure de l'enthalpie de fusion d'un alliage eutectique argent-cuivre, candidat comme matériau de référence en énergie à 779 °C, est également présentée.

LNE-LNHB

Sybelle DELOULE – Développement d'une méthode de caractérisation spectrale des faisceaux de photons d'énergie inférieure à 150 keV utilisés en dosimétrie – Université Paris Sud – *Physique spécialité instrumentation* – 15 octobre 2014.

En dosimétrie, la distribution énergétique des photons émis par une source constitue un paramètre incontournable. Dans la gamme des basses et moyennes énergies ($E < 150$ keV, ici), le LNHB possède cinq tubes à rayons X ainsi que des grains d'iode 125 pour la curiethérapie, présentant des hauts débits de fluence. La détermination du spectre émis par calcul (déterministe ou Monte-Carlo) est limitée, dans la gamme d'énergie considérée, par les incertitudes élevées sur les bases de données ainsi que par les approximations du modèle. La mesure directe avec un détecteur au germanium ultrapur a donc été retenue, bien que nécessitant de lourds moyens. De plus, le spectre mesuré est le produit de convolution du spectre émis recherché par la réponse du système. Une fois la réponse du détecteur modélisée, il est possible de « déconvoluer » la mesure, c'est-à-dire de remonter au spectre réellement émis en corrigeant (par *stripping*, *model-fitting*, inférence bayésienne...) les déformations spectrales induites par le processus de détection. Pour la curiethérapie, le modèle de grain-source a ainsi pu être ajusté. Pour les tubes à rayons X, les résultats obtenus avec différents codes Monte-Carlo et quatre logiciels déterministes ont été comparés à un spectre dit de référence obtenu par mesure et déconvolution. Ainsi l'impact sur certaines grandeurs dosimétriques de la méthode utilisée a pu être quantifié.

Stéphane DUFRENEIX – Établissement de références dosimétriques dans les faisceaux de rayons X de hautes énergies et de très petites sections (< 1 cm²) pour la radiothérapie – Université Paris Sud – *Physique* – 17 décembre 2014.

En tant que laboratoire national pour la métrologie des rayonnements ionisants, le Laboratoire national Henri Becquerel met au point les méthodes de mesures absolues pour les références dosimétriques, entre autres, pour des faisceaux de rayons X de radiothérapie ayant un champ de 100 cm² à 4 cm². Afin de s'approcher des plus petits champs utilisés en clinique, la miniaturisation des détecteurs absolus n'étant pas possible, il est proposé dans cette thèse de remplacer la dose absorbée en un point par le produit dose-surface (PDS).

L'applicabilité du PDS mesuré à l'aide de dosimètres dont la surface sensible est plus grande que celle du champ de rayonnement a été vérifiée. Ainsi, un calorimètre graphite avec un volume sensible de diamètre 3 cm a été conçu, construit et testé. En vue du transfert des références dosimétriques à l'utilisateur, une chambre d'ionisation de même diamètre a elle aussi été réalisée et testée. Son coefficient d'étalonnage en termes de PDS a été déterminé dans des faisceaux circulaires de diamètre 2,1 cm et 0,75 cm avec une incertitude type inférieure à 0,7 %. La distribution relative de la dose absorbée dans l'eau en deux dimensions a été mesurée au moyen d'un dosimètre diamant, d'une chambre d'ionisation *pinpoint* et de films gafchromiques, pour lesquels un protocole de lecture spécifique a été mis au point.

Les résultats dans le faisceau de diamètre 2 cm ont montré un bon accord entre les approches en termes de PDS et de dose absorbée dans l'eau en un point, après application des facteurs de correction obtenus au moyen de simulations Monte-Carlo et des mesures de distribution de dose. Le coefficient d'étalonnage de la chambre d'ionisation de grandes dimensions établi dans le champ de diamètre 2 cm s'écarte de 2,6 % de ceux établis dans les champs de 1 cm et 0,75 cm qui sont eux compatibles aux incertitudes prés. L'utilisation du PDS nécessite donc une surface de détection notablement plus grande que la section du minifaisceau.

LNE-SYRTE

Jean-Marie DANET – Horloge à piégeage cohérent de population du césium en cellule : limitations à la stabilité de fréquence – Université Pierre et Marie Curie – *Physique* – 20 mars 2014.

Cette thèse porte sur l'étude de la stabilité de fréquence d'une horloge atomique à piégeage cohérent de population. Le cadre de cette étude est d'une part d'approfondir la connaissance du piégeage cohérent de population en cellule de vapeur et d'autre part de construire un prototype d'horloge démontrant une stabilité

de fréquence à l'état de l'art des meilleures horloges compactes de laboratoire. Grâce à une interrogation impulsienne et un schéma d'excitation en polarisations linéaires et orthogonales, cette horloge présenterait une stabilité de fréquence relative nettement inférieure à 10^{-13} à 1 s si elle était limitée par un bruit fondamental tel que le bruit de photon. Après une présentation du montage expérimental, la première partie de ce mémoire est consacrée à l'étude des différentes sources de bruit limitant la stabilité de fréquence court-terme. Le soin particulier donné à la modélisation, à la caractérisation expérimentale et à la réduction des transferts de bruit de fréquence de l'oscillateur local (effet Dick) et du bruit d'intensité du laser en bruit de fréquence de l'horloge, a permis de mesurer une stabilité de fréquence au niveau de $3,2 \times 10^{-13}$ à 1 s. Dans un deuxième temps, une étude théorique et expérimentale du déplacement de fréquence micro-onde en fonction de la puissance laser est présentée. Au-delà de la mise en évidence du caractère clé de la déformation de la raie dans l'explication de ce déplacement, elle a posé les bases de la dernière partie de ce mémoire qui propose une méthode d'insensibilisation du déplacement de fréquence aux fluctuations de puissance.

Adèle HILICO – Capteur de forces à atomes piégés dans un réseau optique : caractérisation des performances – École Normale Supérieure de Paris – *Physique* – 8 septembre 2014.

Ce travail de thèse consiste en la réalisation d'un dispositif expérimental de deuxième génération pour le projet FORCA-G (FORce de CASimir et Gravitation à courte distance). L'objectif de ce projet est la mesure des interactions à faible distance entre un atome et une surface massive. La mesure de force est réalisée à l'aide d'interféromètres atomiques utilisant des atomes confinés dans un réseau optique 1D vertical basé sur le déplacement des atomes de puits en puits. La dégénérescence des niveaux d'énergies des atomes dans les puits du réseau est levée par la force que l'on cherche à mesurer. Des transitions Raman permettent de séparer les atomes dans des puits adjacents, puis de les recombiner, créant ainsi un interféromètre atomique qui permet de mesurer la différence d'énergie entre puits, liée à la fréquence de Bloch v_B du réseau. Ce travail présente la mise en place d'un dispositif proprement dédié au projet, qui permettra à terme de mesurer les forces à faible distance. Il rend compte des améliorations obtenues en configuration de gravimètre sur la sensibilité court terme de la mesure qui atteint 5×10^{-6} à 1 s. Il regroupe l'étude des limitations de la sensibilité, de l'exactitude et l'étude de la perte de contraste des interféromètres. Il présente aussi la mise en place d'une étape supplémentaire : l'implémentation d'un piège dipolaire visant obtenir un échantillon d'atomes plus dense et plus froid.

Jean LAUTIER – Développement d'un accéléromètre atomique compact pour la gravimétrie de terrain et la navigation inertielle – Université Pierre et Marie Curie – *Physique quantique* – 10 juillet 2014.

Cette thèse a pour objet le développement d'un prototype de gravimètre atomique compact reposant sur l'interférométrie atomique avec des transitions Raman stimulées. Il démontre une amélioration importante de la compacité et de la simplicité de chaque élément du dispositif expérimental (tête de capteur, source laser, référence de fréquence micro-onde, système de filtrage des vibrations). Ce travail s'appuie sur l'utilisation d'une pyramide creuse comme miroir de rétro-réflexion, ce qui permet de réaliser toutes les fonctions d'un interféromètre atomique (piégeage et refroidissement des atomes, interféromètre, détection) avec un unique faisceau laser. Ainsi, une tête de capteur très compacte est développée, dont les fonctions clés ont toutes été simplifiées. La source laser met en jeu un unique laser émettant à 1 560 nm pour interroger des atomes de rubidium-87. Elle bénéficie de l'utilisation de composants optiques télécoms fibrés, qui ont déjà démontré leur performance et leur robustesse aux conditions environnementales. Tous les éléments du prototype sont assemblés pour permettre la mise en place de l'interféromètre. Ce type de gravimètre compact est très intéressant pour la gravimétrie de terrain. En parallèle, un système de réjection du bruit de vibration a été développé, basé sur l'électronique numérique. La contribution des vibrations sur la phase atomique est pré-compensée avant la fermeture de l'interféromètre, directement sur la phase optique des lasers. Ceci garantit que chaque point de mesure a une sensibilité maximum, malgré un bruit de d'accélération important. Ainsi, pour un gravimètre posé au sol en environnement urbain, ce travail de thèse a démontré une sensibilité à l'accélération de l'ordre de 10^{-6} à 1 s, qui atteint après 300 s d'intégration. Ce dispositif a finalement conduit à l'hybridation complète du gravimètre atomique avec un accéléromètre classique, conduisant à un accéléromètre exact très large bande [DC, 430 Hz]. Ce résultat est très prometteur, notamment pour la navigation inertielle.

Igor MORIC – *On ground characterization of the cold atoms space clock PHARAO* – Université Pierre et Marie Curie – *Physique quantique* – 19 décembre 2014.

La thèse présente les résultats expérimentaux obtenus au cours du développement et des essais au sol du modèle de vol de l'horloge à atomes froids PHARAO. PHARAO est le premier étalon primaire de fréquence dédié aux applications spatiales et est développé par l'agence spatiale française : le CNES. PHARAO est un des principaux instruments de la mission spatiale de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) : ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*) dont le lancement est prévu en 2016. La mission est basée sur des comparaisons de temps et de fréquence de très hautes performances entre PHARAO et un

ensemble d'horloges basées au sol, pour effectuer des tests en physique fondamentale. La charge utile sera installée sur un module extérieur de la Station spatiale internationale (ISS).

Après une introduction sur les horloges atomiques et un résumé de la mission ACES, l'architecture de PHARAO, optimisée pour la microgravité, et son fonctionnement sont décrits. Puis, cette thèse présente les mesures et l'analyse de la stabilité de fréquence de l'horloge. Au sol, la stabilité de fréquence est mesurée à un niveau de $3,1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, cette valeur étant en accord avec les différentes sources de bruit ; en microgravité, la stabilité atteindra $10^{-13} \tau^{-1/2}$. Pour terminer, les principaux déplacements de fréquence sont analysés. Une étude détaillée est donnée sur les propriétés des blindages magnétiques, leurs hystérésis et la conception d'une compensation magnétique active. L'objectif est de réduire l'incertitude de mesure du second ordre de l'effet Zeeman au niveau de quelques 10^{-17} . La détermination de la température de l'environnement des atomes est également analysée, avec l'objectif d'atteindre une incertitude sur le déplacement de fréquence due au rayonnement du corps noir dans la gamme de 10^{-17} . Un budget préliminaire d'incertitude de la fréquence de l'horloge au sol est évalué à $1,1 \times 10^{-15}$. Ce budget est compatible avec un objectif de 3×10^{-16} en microgravité. La prochaine étape verra l'assemblage tous les autres instruments ACES pour un lancement prévu en 2016.

Yan Wenhua – Conception d'un guide magnétique pour des mesures de rotation avec une puce à atome – Université Pierre et Marie Curie – *Physique* – 1^{er} décembre 2014.

Le travail de thèse consiste en la conception et la réalisation d'un montage expérimental pour le développement d'un interféromètre à atomes froids de ^{87}Rb guidés sur un microcircuit à atomes, l'objectif final étant la réalisation d'un capteur inertielle de rotations. La théorie du confinement magnétique des atomes dans un guide circulaire a ainsi été examinée. Une telle étude a permis d'identifier les principales problématiques liées à la propagation sur une orbite stable d'un paquet d'onde atomique dans un guide magnétique, à savoir: la rugosité du potentiel de guidage, les défauts du potentiel associés au motif de microfils employés pour créer ce potentiel, et les pertes par effet Majorana. Dans cette thèse, il est proposé des solutions originales à ces problèmes sur la base des études précédentes et sur les résultats de nos calculs. Du point de vue expérimental, une nouvelle expérience d'atomes froids a été montée dont la principale caractéristique est d'être compacte et donc transportable pour des mesures locales de vitesses de rotations. L'équipe a, au cours de ce travail, assemblé un système à ultraviolet efficace, développé un banc optique très compacte comprenant des sources laser pour le refroidissement et piégeage des atomes, un laser de Bragg

pour la réalisation de l'interféromètre atomique, ainsi que toute l'électronique de contrôle de cette expérience.

LNE-LTFB

Nicolas CHRETIEN – Electroniques dédiées à l'asservissement d'oscillateurs et à la mesure physique à l'aide de capteurs à ondes élastiques – Université de Franche-Comté – *Science de l'ingénieur/Electronique* – 27 juin 2014.

Le travail en bande de base permet de s'affranchir du bruit de multiplication de fréquence d'un signal. Cependant, la conception d'un oscillateur fonctionnant à haute fréquence nécessite d'avoir un composant sélectif en fréquence, fonctionnant à haute fréquence et avec un facteur de qualité élevée. L'approche proposée dans cette thèse consiste à évaluer un composant à onde élastique de volume à harmoniques élevées, le HBAR, pour la réalisation d'un oscillateur compact et stable, travaillant en bande de base à 2,45 GHz, à des fins d'utilisation de source de fréquence pour un système RADAR. Les oscillateurs réalisés présentent un bruit de phase de $-100 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ pour un écart à la porteuse de 1 kHz, avec une perspective d'amélioration de l'ordre de $10 \text{ dBc} \cdot \text{Hz}^{-1}$ de cette valeur d'après la simulation. L'étude porte également sur l'analyse de l'influence du bruit de phase de l'oscillateur local sur la résolution d'une mesure RADAR dont l'effet est démontré expérimentalement en utilisant une ligne à retard à onde élastique de surface (SAW) comme cible RADAR coopérative. Le travail effectué sur cette cible coopérative a permis d'aboutir à un prototype l'électronique embarqué pour l'interrogation de lignes à retard à ondes élastiques utilisées en tant que capteurs passifs interrogeables à distance. L'architecture de l'interrogateur combine une méthode RADAR impulsionnelle à un système d'échantillonnage en temps équivalent permettant de réduire l'importance de la puissance de calcul dans le traitement de la réponse. Les inconvénients de l'échantillonnage en temps équivalent sont minimisés par une interrogation judicieuse pour acquérir seulement les points nécessaires à la mesure. Les mesures effectuées sur un capteur de température commercial présentent une résolution de $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ avec une bande passante de 35 kHz. Pour les applications nécessitant une bande passante plus élevée (allant jusqu'à 200 kHz), un second prototype n'ayant pas de restriction sur les ressources de calcul mises en œuvre est également présenté dans cette thèse, combinant la même méthode impulsionnelle avec un échantillonnage en temps réel.

Alexandre CLAIRET – Modélisation et analyse numérique de résonateurs à quartz à ondes de volume – Université de Franche-Comté – *Science de l'ingénieur /Electronique* – 26 septembre 2014.

Ces travaux de thèse portent sur le développement d'un outil d'analyse numérique dédié à l'étude de nouveaux résonateurs à quartz à ondes de volume et utilisant les éléments finis. Cette méthode de caractérisation permet la détermination des éléments du schéma électrique équivalent (résistance, inductance et capacité) d'une fréquence de résonance donnée ainsi que son facteur de qualité, tout en prenant en compte dans le modèle la sensibilité du cristal de quartz à la température et aux contraintes induites par le montage. Une étape de validation est d'abord réalisée afin de vérifier les choix, en termes de modélisation et de calcul, en confrontant les données issues de la simulation aux mesures de résonateurs déjà existants. Les trois dispositifs analysés (40 MHz, 10 MHz et 100 MHz) montrent une bonne concordance entre théorie et expérience. Pour obtenir de tels résultats, la structure de maintien est prise en compte et modélisée sous forme de zones d'amortissement de Rayleigh lorsque le piégeage de l'énergie n'est pas optimal (présence d'un mode de plaque). Un aspect important des résonateurs est ensuite étudié : le comportement en température. En effet, les contraintes de dilatation thermique ainsi que l'évolution des coefficients élastiques en fonction de la température induisent une dérive fréquentielle. La comparaison entre théorie et expérience a permis de vérifier l'allure des courbes et de quantifier le degré de précision du modèle. L'effet d'une contrainte mécanique appliquée sur le pourtour de la lame de quartz est par la suite introduit dans le modèle en utilisant la méthode de perturbation de Sinha-Tiersten. Il est alors possible de définir l'impact des défauts de fabrication sur la fréquence du résonateur. Enfin, la méthode numérique est appliquée à l'étude de structures innovantes dans le cadre du projet FREQUENCE2009. Il s'agit de revisiter le concept du résonateur BVA et d'envisager des procédés de fabrication collective. L'idée consiste ainsi à remplacer le rayon de courbure d'un résonateur, dont la fréquence utile se trouve aux alentours de 9 MHz, par une série de marches, plus compatible avec les procédés de la microélectronique (DRIE : *Deep Reactive Ion Etching*). Bien que les résultats expérimentaux soient, dans ce cas, loin des attentes, il a été constaté que l'outil d'analyse est parfaitement capable de prédire les caractéristiques de nouvelles structures.

Santunu GHOSH – *Investigation of the origin 1/f noise in quartz crystal resonator* – Université de Franche-Comté – *Science de l'ingénieur/Électronique* – 17 octobre 2014.

Depuis quelques décennies, la technologie de contrôle de la fréquence a été au cœur de l'électronique des temps modernes grâce à son vaste domaine d'applications dans les systèmes de communication, les ordinateurs, les systèmes de navigation ou de défense militaire. Les dispositifs temps-fréquence fournissent des stabilités de fréquences et de puretés spectrales élevées dans le domaine de la stabilité à court terme. L'amélioration de la

performance de ces dispositifs reste un grand défi pour les chercheurs. La réduction du bruit, afin d'augmenter cette stabilité à court terme et d'éviter les communications non souhaitées entre les canaux, est donc très souhaitable. Il est communément admis que la limitation fondamentale à cette stabilité à court terme est due au bruit de Flicker de fréquence des résonateurs. Dans le manuscrit de thèse, un premier chapitre rappelle quelques faits de base sur l'acoustique, la cristallographie et les définitions du domaine temps-fréquence nécessaires à l'étude des résonateurs et oscillateurs ultrastables. Le deuxième chapitre est consacré à un résumé des publications sur le bruit de fréquence en $1/f$. Le troisième chapitre concerne les études faites sur le modèle quantique de bruit en $1/f$ du professeur Handel, qui, bien que critiqué par beaucoup, est encore le seul qui fournit une estimation de l'amplitude de plancher de bruit en $1/f$ et qui n'est pas infirmé par les données expérimentales. Dans le quatrième chapitre, une autre approche, basée sur le théorème de fluctuation-dissipation, est utilisée afin de mettre des contraintes numériques sur un modèle de bruit en $1/f$ causé par une dissipation interne (ou de structure) proportionnelle à l'amplitude, et non à la vitesse. Le dernier chapitre est consacré aux résultats expérimentaux. La conception et les paramètres du résonateur ultrastable utilisé lors de cette étude sont décrits. Les mesures de bruit de phase sur plusieurs lots de résonateurs sont données. Les mesures des paramètres du résonateur ont été effectuées à basse température afin de les corrélérer avec les résultats du bruit. Afin d'évaluer rapidement la qualité des différents résonateurs, une autre approche dans le domaine temporel a été testée : elle utilise des oscillations pseudo-périodiques transitoires mettant les oscilloscopes numériques actuellement disponibles à leurs limites de capacité. Enfin, les conclusions et perspectives sont présentées.

Marc LAMOTHE – Capteurs à ondes élastiques de surface à codage spectral ultralarge bande – Université de Franche-Comté – *Science de l'ingénieur/Électronique* – 10 décembre 2014.

Le codage spectral ultralarge bande (ULB) appliqué aux dispositifs à ondes élastiques de surface (SAW), exploités comme capteurs passifs interrogeables par liaison radiofréquence, augmente le nombre de données stockées et échangées et améliore la résolution sur la mesure. L'approche proposée est de réaliser des dispositifs SAW ULB dans la bande de fréquence 2 GHz – 2,5 GHz réglementée par la norme de communication radiofréquence américaine, après prototypage dans une bande de fréquences plus basses de 200 MHz - 400 MHz. La puissance autorisée sur cette première bande est de 41,3 dBm/MHz : pour un dispositif SAW ayant des pertes d'insertion de l'ordre de 30 dB, la distance d'interrogation établie par application de l'équation du RADAR est théoriquement limitée à environ 1 m. Afin d'avoir la portée la plus grande possible, cette thèse a permis

d'étudier plusieurs architectures de dispositifs SAW : standards et modulés linéairement en fréquence, pour limiter les pertes d'insertion. À l'aide d'un lecteur embarqué, des mesures en température sans fils simultanées de trois capteurs ont été réalisées, apportant une solution au problème de collision. La résolution en température atteinte est de 0,1 °C pour une distance de mesure de 20 cm. Ces résultats montrent que la

communication ULB est aussi une solution pour l'interrogation sans fils en milieux réfléchissants aux ondes radio fréquences. À l'aide d'un synthétiseur de fonction arbitraire et d'un oscilloscope, il est montré expérimentalement que le retournement temporel fonctionne sur les dispositifs SAW LFM et qu'il bénéficie du gain de traitement ce qui améliore le rapport signal sur bruit.

Synthèses des travaux présentés en 2014 pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR)

LNE-LCM

Stéphan BRIAUDEAU – De la spectroscopie laser à la métrologie des températures – Université Paris 13 – Sciences – 8 décembre 2014.

Cette habilitation à diriger des recherches reprend les principaux travaux scientifiques menés de la spectroscopie laser à la métrologie des températures. Les travaux effectués en doctorat, avec l'équipe OCR du LPL (Univ. Paris 13), ont permis de démontrer l'effet Dicke optique en vapeur atomique confinée entre deux parois diélectriques proches. Puis, en tant maître de conférences au Cnam, les travaux de recherche menés au sein du département de métrologie des hautes températures par pyrométrie optique du LCM ont conduit à développer de nouvelles références de l'Échelle internationale de température de 1990 pour son extension jusqu'à 3 000 K. Une instrumentation optique (un luminancemètre et un pyromètre accordable) a été conçue et développée afin de déterminer par mesure du rayonnement (loi de Planck) la température thermodynamique de ces corps noirs de référence. Simultanément et en collaboration avec le LPL, un thermostat dédié à la détermination de la constante de Boltzmann par spectrométrie laser (mesure d'élargis-

sement Doppler d'une raie moléculaire) a été développé. Enfin, en délégation au LPN du CNRS, les travaux ont permis de ralentir la lumière par oscillation cohérente de population pour des applications d'optique quantique.

LNE-SYRTE

Yann LE COQ – *Optical Frequency combs and optical frequency measurements* – Université Pierre et Marie Curie – *Optique* – 28 janvier 2014.

Les peignes de fréquences optiques autoréférencés constituent aujourd'hui les outils de choix en temps-fréquences pour mesurer avec des très hautes stabilités et exactitudes des fréquences optiques. Au delà de cette activité de mesure proprement dite, ils trouvent également des applications novatrices variées à très hautes performances, telles que, par exemple, la génération de signaux micro-ondes à très bas bruit de phase et le transfert de pureté spectrale entre différentes fréquences optiques. Le manuscrit de HDR décrit différents travaux autour de ces outils versatiles réalisés au NIST (Boulder, Colorado, États-Unis) et au LNE-SYRTE (Paris, France) entre 2004 et 2014.