

Thèses de doctorat en sciences soutenues en 2011

Ph.D. Thesis presented in 2011

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 2011 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. A la suite des thèses, sont également reportés les thèmes de recherche qui ont fait l'objet d'une soutenance en 2011 pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR) par des chercheurs du réseau de la métrologie française.

LNE

Alexandre MORILHAT – Synthèse de couches minces résistives par pulvérisation cathodique magnétron pour l'élaboration de résistances étalons calculables en courant alternatif. – Université de technologie de Belfort-Montbelliard – *Sciences pour l'ingénieur et microtechniques* – 11 janvier 2011.

L'élaboration de résistances calculables basées sur des dépôts de couches métalliques ultra minces s'inscrit dans un objectif général d'amélioration de la connaissance des constantes fondamentales de von Klitzing R_K et de structure fine α , pour une contribution à la future nouvelle définition des unités électriques dans le Système international d'unités. Dans ce cadre, le Laboratoire national de métrologie et d'essais a développé un nouveau modèle d'étalon de résistance en courant alternatif, compact et robuste, basé sur le dépôt d'un film métallique ultra mince. Cette thèse a pour objet l'étude et la caractérisation de ces revêtements à base de $Ni_{80}Cr_{20}$, $Ni_{50}Cr_{50}$ et d'Evanohm déposés sur des substrats cylindriques en céramique, par pulvérisation cathodique magnétron.

Ce travail a d'abord permis la maîtrise des dépôts de couches ultra minces métalliques résistives sur des substrats cylindriques pour obtenir, compte tenu des très faibles épaisseurs des films, une homogénéité sur toute la longueur du bâtonnet de céramique et de très fortes résistivités par carré. Les caractéristiques des films telles

que l'épaisseur, l'homogénéité (en épaisseur et en composition) ou encore la structure cristalline ont été déterminées. Une large gamme de valeurs de résistance a été fabriquée allant de quelques ohms à 200 kW alors que les valeurs obtenues précédemment étaient limitées à 10 kW. Le comportement en fréquence de ces résistances a été caractérisé au moyen d'un pont d'impédance coaxial à quatre paires de bornes. La variation en fréquence, entre le continu et 1 600 Hz, a été trouvée inférieure à 10^{-8} en valeur relative, ce qui démontre la capacité de ces dispositifs à servir d'étalons primaires de résistance en courant alternatif. Par ailleurs, des mesures d'impédance ont été effectuées aux fréquences intermédiaires (100 kHz – 100 MHz). La variation en fréquence de ces résistances est 100 fois inférieure à celle des meilleurs étalons d'impédance (capacité étalon) utilisés dans cette gamme de fréquences. Ceci ouvre la voie au développement d'un nouveau type d'étalons d'impédance couvrant le domaine de fréquences allant du continu jusqu'à 100 MHz.

Adrien CAURANT – Développement d'une méthode de production de matériaux de référence pour le contrôle qualité des analyses des composés organiques volatils réalisés en air intérieur. – Université Denis Diderot Paris VII – *Chimie analytique* – 14 mars 2011.

Les composés organiques volatils (COV) font partie des polluants ubiquitaires de notre environnement. Ils sont notamment présents dans les atmosphères intérieures à des

concentrations souvent supérieures à celles rencontrées dans l'air ambiant. Ces composés sont par ailleurs reconnus comme ayant des effets néfastes sur la santé. De nombreuses études nationales et internationales ont ainsi vu le jour afin d'en assurer le suivi dans les espaces clos. La majorité de ces études font appel à des méthodes analytiques communes consistant en un prélèvement sur cartouches adsorbantes, suivi d'une analyse par thermodésorption et chromatographie en phase gazeuse. Afin de pouvoir assurer la traçabilité et la comparabilité des analyses, il est indispensable de disposer de références communes : c'est le rôle des matériaux de référence certifiés (MRC) à matrice. Or, peu de MRC, totalement traçables aux unités du Système international d'unités (SI), contenant des COV à des concentrations rencontrées en air intérieur sont disponibles.

Les travaux de cette thèse ont consisté à développer une méthode de production pour ce type de MRC. Après avoir développé, optimisé puis validé la méthode analytique basée sur de la thermodésorption associée à la chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme (ATD/GC-FID), deux méthodes de chargement de cartouches adsorbantes ont été développées. Tout d'abord une technique par vaporisation d'une solution étalon a permis le chargement de $500 \text{ ng} \pm 5 \%$ de benzène. Ensuite, une méthode par pompage d'un mélange gazeux étalon a permis la production d'un MRC de benzène contenant $500 \text{ ng} \pm 2 \%$. Des études de stabilité, d'homogénéité ainsi qu'un essai inter-laboratoires ont permis de valider le MRC de benzène produit. Ces travaux de thèse ont finalement permis de développer et de valider deux procédés différents de production de matériaux de référence pour les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène) qui pourront être appliqués dans le futur pour la production de matériaux de référence contenant un plus grand nombre de COV rencontrés dans les habitats.

Jérémy GUIGNARD – Étude de l'effet Hall quantique dans le graphène exfolié en vue d'une application en métrologie quantique. – Université Paris-Sud 11, Orsay – *Physique de la matière condensée* – 8 juillet 2011.

L'effet Hall quantique (EHQ), observé à basse température et sous fort champ magnétique dans des gaz bidimensionnels d'électrons, comme ceux fabriqués avec les semiconducteurs GaAs et GaAlAs, a révolutionné la métrologie des résistances car il permet d'obtenir un étalon quantique de résistance qui ne dépend que de e et h (respectivement la charge de l'électron et la constante de Planck). Dans ce contexte, la physique du graphène suscite de l'intérêt pour la métrologie. Les écarts en énergie entre les premiers niveaux de Landau, en jeu dans la quantification de la résistance de Hall, sont supérieurs dans la monocouche (l'épaisseur de la feuille de carbone est celle d'un atome de carbone) et dans la bicouche (deux monocouches) par rapport à ceux dans GaAs. Ceci rend l'E HQ dans le graphène plus robuste et laisse envisager le développement d'un étalon plus pratique (travaillant à plus haute température $> 4,2 \text{ K}$ ou plus faible champ magnétique, quelques teslas) compatibles avec des

dispositifs cryomagnétiques sans hélium. En outre, le graphène qui présente une physique très originale de fermions de Dirac chiraux offre l'opportunité d'un test d'universalité de l'E HQ très convaincant, susceptible de soutenir la redéfinition du Système international d'unités à partir des constantes fondamentales.

Durant la thèse, un protocole de fabrication de barres de Hall en graphène exfolié a été mis en place comprenant un repérage optique, des lithographies électroniques, la métallisation de contacts, la gravure plasma... L'utilisation de substrat de silicium oxydé en surface a rendu possible l'utilisation d'une grille électrostatique en face arrière pour faire varier la densité et la nature des porteurs de charge (électrons ou trous). En outre la géométrie des échantillons a été optimisée pour répondre au mieux aux contraintes métrologiques. À basse température, le dopage résiduel obtenu après le recuit *in situ* est de l'ordre de 3 à $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Les mobilités des porteurs sont proches de $4000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $2300 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ respectivement pour les échantillons monocouche et bicouche. Le transport mésoscopique a été caractérisé à basse température par des mesures de localisation faible et de fluctuations universelles de conductance. La longueur de cohérence extraite est de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$ à $1,5 \text{ K}$. La résistance des contacts mesurée en régime d'E HQ est plutôt faible (quelques ohms). L'E HQ a été étudié en détail à basse température ($300 \text{ mK} < T < 1,5 \text{ K}$) et sous fort champ magnétique (jusqu'à $18,5 \text{ T}$) à la fois dans la monocouche et la bicouche en mesurant de manière précise la résistance de Hall (R_H) et la résistance longitudinale (R_{xx}). Les mesures fines de R_H ont été réalisées à l'aide d'un pont de comparaison fondé sur un comparateur cryogénique de courant ; elles consistent à comparer indirectement l'E HQ dans l'échantillon de graphène à l'E HQ obtenu dans une barre de Hall en GaAs/AlGaAs qui est supposée fournir exactement la valeur $R_K/2$ (R_K est la constante de Klitzing théoriquement égale à h/e^2).

Les mesures révèlent un accord entre la résistance de Hall dans le graphène et la valeur attendue avec une incertitude de quelques 10^{-7} . À plus faible courant et dans l'état de dissipation minimale (R_{xx} proche de 0), l'accord a été obtenu avec une incertitude relative de 3×10^{-7} . Ce niveau de précision est principalement limité par la petite taille des échantillons et par les inhomogénéités de la densité qui y sont présents, ces deux caractéristiques amenant de faibles courants de rupture de l'E HQ ($1 \mu\text{A}$ à $2 \mu\text{A}$). Toutefois, ces résultats sont à ce jour les tests les plus précis concernant l'E HQ dans du graphène exfolié et les premiers tests réalisés sur une bicouche. Ils confirment le potentiel de l'E HQ dans le graphène pour une application de métrologie.

François BLARD – Conception et réalisation de référence de tensions alternatives à base de MEMS. – Université Paul Sabatier, Toulouse III – *MicroNano Systèmes* – 29 septembre 2011.

Les systèmes microélectromécaniques (MEMS) sont d'excellents candidats pour la métrologie électrique. En

effet, grâce au couplage électromécanique dans les MEMS, il est possible de réaliser des références secondaires de tension continue (DC) ou alternative (AC) ayant des valeurs de quelques volts à quelques centaines de volts avec des stabilités relatives pouvant atteindre quelques 10^{-7} par an. Celles-ci peuvent alors être une alternative aux actuelles références Zener dans le cas de la tension continue, et constitueront une première pour la tension alternative puisque aucune référence n'existe hormis celle basée sur l'effet Josephson.

Ce travail de thèse a été dédié au développement et à la fabrication de plusieurs générations de structures MEMS à capacité électrique variable dans lesquelles le phénomène du *pull-in* est exploité pour réaliser des références de tension alternative. Le dessin technique des échantillons, basé sur des architectures spécifiques correspondant à différents modes de déplacement de l'électrode mobile, est réalisé grâce à des modélisations sous ConventorWare. On distingue des structures à débattement vertical favorisant un déplacement en mode piston de la membrane mobile et des structures à peignes interdigités à déplacement dans le plan. Ces différentes structures ont été fabriquées à partir d'un procédé technologique industriel MPW (*Multi-project Wafer*) de la société Tronic's, basé sur un substrat SOI (*Silicon On Insulator*). En parallèle, un procédé technologique dédié a été mis au point pour s'adapter aux exigences particulières des applications du laboratoire. Les références de tension alternative ainsi développées présentent des tensions de *pull-in* variant de 2 V à 100 V avec des fréquences de résonance mécanique mesurées par DLTS (*Deep Level Transient Spectroscopy*) de seulement quelques kilohertz. Ce dernier résultat permet d'envisager l'utilisation de ces références de tension alternative sur une large gamme de fréquences (de quelques dizaines de kilohertz jusqu'à quelques mégahertz). Un dispositif électronique de commande a également été développé pour être spécifiquement adapté aux caractéristiques des MEMS du laboratoire et pour intégrer une régulation de la température au millikelvin près. La stabilité de la tension des MEMS a été mesurée sur plus de 150 heures avec une fluctuation inférieure au millionième à 50 kHz et 100 kHz. Les essais à plusieurs centaines de kilohertz sont également très prometteurs. La dépendance en température est dix fois plus petite que celle rapportée antérieurement, permettant ainsi de s'affranchir de plate-formes de stabilisation thermique sophistiquées.

LNE-IRSN

Vincent LAMIRAND – Détermination de sections efficaces pour la production de champs neutroniques monoénergétiques de basse énergie. – Université Joseph Fourier Grenoble 1 – *Physique subatomique et astroparticules* – 18 novembre 2010.

La réponse d'un détecteur de neutrons varie avec l'énergie du neutron incident. La détermination expérimentale de cette variation se réalise au moyen de champs neutroniques monoénergétiques. Ceux-ci sont produits par l'interaction entre un faisceau d'ions

accélérés et une cible fine constituée d'un dépôt réactif sur un support métallique. En utilisant différentes réactions telles que ${}^7\text{Li}(p,n)$, ${}^3\text{H}(p,n)$, ${}^2\text{H}(d,n)$ et ${}^3\text{H}(d,n)$, il est possible de produire des neutrons entre 120 keV et 20 MeV dans la direction du faisceau incident (0°). Pour atteindre des énergies inférieures, il est possible d'augmenter l'angle du point de mesure par rapport à la direction du faisceau d'ions. Cependant, cette méthode présente des problèmes d'homogénéité en énergie et en fluence des neutrons à la surface du détecteur, ainsi qu'une augmentation de la proportion de neutrons diffusés. Une alternative est l'utilisation d'autres réactions nucléaires, notamment la réaction ${}^{45}\text{Sc}(p,n)$ qui permet de descendre jusqu'à des énergies de 8 keV à 0° .

Une étude complète de cette réaction et de sa section efficace a été menée au sein d'une coopération scientifique entre le Laboratoire de métrologie et de dosimétrie des neutrons (LMDN) de l'IRSN, deux instituts de métrologie européens, le NPL (*National Physical Laboratory*) et le PTB (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), et l'IRMM (*Institute for Reference Materials and Measurements*). Parallèlement, d'autres réactions envisageables ont été étudiées : ${}^{65}\text{Cu}(p,n)$, ${}^{51}\text{V}(p,n)$, ${}^{57}\text{Fe}(p,n)$, ${}^{49}\text{Ti}(p,n)$, ${}^{53}\text{Cr}(p,n)$ et ${}^{37}\text{Cl}(p,n)$. Elles ont été comparées en termes d'émission neutronique et d'énergie minimale des neutrons produits.

LNE-LCM

Emeline ANDRIEUX – Réalisation d'un oscillateur paramétrique optique stabilisé en fréquence et accordable continûment sur 500 GHz pour la spectroscopie infrarouge. – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Laser, métrologie et communication* – 16 décembre 2011.

L'oscillateur paramétrique optique simplement résonant (SRO) développé dans le cadre de ces travaux est basé sur un cristal non linéaire de niobate de lithium dopé 5 %-MgO et périodiquement polarisé (ppMgCLN). Il est pompé à 1 064 nm par une diode laser en cavité étendue balayable continûment de 1 050 nm à 1 070 nm injectant un amplificateur Yb-fibré de puissance 10 W. Il génère une onde idler comprise entre 3 μm et 4 μm et une onde signal entre 1 450 nm et 1 650 nm. La cavité SRO est asservie sur le pic de transmission d'une cavité Fabry-Perot de grande finesse. Un balayage mono-fréquence sans saut de mode de l'onde idler sur 500 GHz a pu être démontré. Cette large accordabilité continue pourrait être utilisée pour la spectroscopie haute résolution multi-espèces dans le moyen infrarouge. Par ailleurs, la théorie ondes planes du SRO a été revisitée, dont les solutions analytiques ont été données pour la première fois en 1969 par Kreuzer sous la forme d'une équation transcendante, en utilisant une méthode perturbative très puissante qui tient compte de la déplétion de la pompe. Ainsi les relations d'entrée-sortie du SRO ont été déterminées sous la forme de relations explicites très simples, montrant que les puissances de sortie sont proportionnelles à la racine cubique de la puissance pompe.

Rihan ABDALLAH – Sources laser non linéaires accordables dans l'infrarouge et l'ultraviolet pour la métrologie des rayonnements optiques. – Conservatoire national des arts et métiers, Paris – *Laser, métrologie et communication* – 19 décembre 2011.

L'objet de cette thèse porte sur la conception et la réalisation de deux sources laser non linéaires accordables dans les domaines infrarouge (IR) et ultraviolet (UV), pour le raccordement de la sensibilité spectrale de détecteurs au moyen du radiomètre cryogénique du laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM).

La source IR est un oscillateur paramétrique optique (OPO) résonant sur les ondes pompe et signal (PRSR), utilisant un cristal de niobate de lithium à inversion de domaines de polarisation dopé par 5 % d'oxyde de magnésium (ppMgCLN). Pompé par un laser Ti:Al₂O₃ en anneau mono-fréquence et accordable, délivrant 500 mW de puissance utile autour de 795 nm, l'OPO possède un seuil d'oscillation de 110 mW. Une couverture spectrale continue entre 1 µm et 3,5 µm a été obtenue, avec des puissances de l'ordre du milliwatt pour l'onde signal (1 µm à 1,5 µm) et des puissances comprises entre 20 mW à 50 mW pour l'onde complémentaire couvrant une octave de longueurs d'onde IR entre 1,7 µm et 3,5 µm.

La source UV est obtenue par doublage de fréquence en cavité externe du laser Ti:Al₂O₃, dans un cristal de triborate de lithium (LiB₃O₅). Un accord de phase en température à angle d'accord de phase fixé permet l'obtention d'une couverture spectrale comprise entre 390 nm et 405 nm. L'asservissement de la cavité de doublage sur la fréquence du laser Ti:Al₂O₃ par la méthode de *Pound-Drever-Hall*, ainsi qu'une adaptation de mode optimale, permet d'obtenir une puissance de 5,64 mW à 400 nm à partir de 480 mW de puissance fondamentale.

LNE-LNHB

Maiwenn LE ROY – Étude de références dosimétriques nationales en radiothérapie externe : application aux irradiations conformationnelles. – Université Nice Sophia Antipolis – *Physique* – 8 septembre 2011.

Le développement de nouvelles modalités de traitement telles que la radiothérapie conformationnelle avec modulation d'intensité (RCMI) et la radiothérapie stéréotaxique s'accompagne d'une utilisation croissante de champs d'irradiation complexes obtenus par superposition de faisceaux de petite taille ayant de multiples angles d'incidence. Ces nouvelles conditions de traitement sont très différentes des conditions de référence sur lesquelles se basent les protocoles dosimétriques internationaux.

L'objet de ces travaux de thèse est la réalisation de références dosimétriques pour des champs d'irradiation de dimensions inférieures à (10 × 10) cm², à savoir (4 × 4) cm² et (2 × 2) cm². Il s'agit, dans la pratique, de comparer les coefficients d'étalonnage d'une chambre d'ionisation en termes de dose absorbée dans l'eau, pour

les faisceaux de photons de 6 MV (avec et sans cône égalisateur) et de 12 MV de l'accélérateur linéaire médical du LNHB. Les références ont été déterminées à partir d'une mesure par calorimétrie graphite. Un calorimètre disposant d'un absorbeur de petites dimensions a été construit pour les mesures en champ (2 × 2) cm². Par ailleurs, une chambre d'ionisation adaptée à cette taille de champ a été recherchée.

Pour les faisceaux étudiés, les résultats obtenus montrent que le coefficient d'étalonnage de la chambre d'ionisation de référence est indépendant de la dimension du champ d'irradiation entre (10 × 10) cm² et (2 × 2) cm², aux incertitudes près (environ 0,4 % à un écart type).

LNE-SYRTE

Christian DEUTSCH – Horloge atomique piégée sur puce à atomes - Effets de rotation de spins identiques dans une horloge à atomes ultra-froids piégés – Observatoire de Paris – *Physique/Physique atomique* – 19 octobre 2011.

Cette thèse décrit la spectroscopie à haute résolution d'atomes de ⁸⁷Rb piégés magnétiquement en appliquant une transition à deux photons entre les états hyperfins $|F = 1, m_F = -1\rangle$ et $|F = 2, m_F = 1\rangle$ de l'état fondamental. L'étalement spatial du déplacement de la fréquence est minimisé en équilibrant les contributions des déplacements Zeeman et collisionnels menant à des longs temps de cohérence. L'expérience vise à démontrer la faisabilité d'un étalon de fréquence secondaire avec une stabilité relative de quelques $10^{-13} \times \tau^{-1/2}$.

Après une description théorique de l'expérience, sa réalisation expérimentale, la stabilité à court terme obtenue est de $6,6 \times 10^{-13} \times \tau^{-1/2}$. L'étude se focalise sur la description du processus de déphasage de l'état en superposition cohérente. Dans le régime des collisions quantiques d'un gaz non dégénéré, l'étude explore un nouveau mécanisme d'auto-synchronisation, résultant de l'effet de rotation des spins identiques, qui contrebalance le déphasage de l'ensemble. L'observation du contraste des franges de Ramsey et de la fréquence de transition est réalisée dans le régime de forte synchronisation, où le déphasage est arrêté. Dans le régime de synchronisation intermédiaire, il résulte des résurgences caractéristiques du contraste.

Amandine PROIA – Contribution à l'étalonnage en absolu d'une chaîne de réception GNSS – Observatoire de Paris, École doctorale d'astronomie et d'astrophysique d'Ile-de-France – *Physique/Instrumentation* – 10 novembre 2011.

Les chaînes de réception de signaux satellitaires de navigation (GNSS), composées d'un récepteur, d'un câble d'antenne et d'une antenne, sont l'outil le plus utilisé lors de comparaisons d'horloges atomiques distantes nécessaires pour le calcul du temps atomique international (TAI). L'étalonnage de ces liens de temps, consistant à déterminer leur retard électrique lors de la propagation du

signal au travers du système d'acquisition, est nécessaire afin de garantir leur exactitude et leur stabilité à long terme. Deux techniques d'étalonnage sont actuellement recensées : la méthode différentielle et la méthode en absolu. La technique différentielle consiste à comparer l'ensemble de la chaîne de réception à étalonner avec une chaîne de référence dont le retard est connu. Cette dernière circule de laboratoires en laboratoires afin que le BIPM puisse déterminer le délai interne des équipements opérationnels installés dans les laboratoires visités. La technique d'étalonnage dite « en absolu » consiste à déterminer indépendamment le retard électrique interne de chaque élément de la chaîne de réception en utilisant des signaux simulés permettant de s'affranchir des bruits liés à la diffusion de signaux satellitaires. Le CNES (Centre national d'études spatiales) développe cette technique depuis 2005.

Les travaux de cette thèse ont contribué au développement et à l'optimisation des méthodes d'étalonnage en absolu de chacun des éléments de la chaîne de réception afin de déterminer le retard global de la chaîne d'acquisition avec une incertitude inférieure à une nanoseconde. Cette méthode d'étalonnage a permis également de caractériser les performances de chacun des composants du système d'acquisition ainsi que la sensibilité thermique et hygrométrique des récepteurs.

LNE-Arts et Métiers ParisTech CER Paris

Leonardo Moreira LEÓDIDO – Contribution à l'étalonnage dynamique de capteurs de pression en hautes pressions. – Arts et Métiers ParisTech, Paris – *Sciences des Métiers de l'Ingénieur* – 16 décembre 2011.

La variation dynamique de grandeurs physiques est présente dans la plupart des phénomènes physiques. Mesurer et évaluer ces grandeurs n'est pas évident. Donc il faut développer des systèmes de mesure qui doivent être soumis à un étalonnage dynamique, c'est-à-dire déterminer leurs fonctions de transfert et leurs caractéristiques en régime dynamique. Dans le domaine de la pression, l'étalonnage en régime dynamique est étudié depuis les années 1960 avec le développement de dispositifs, de méthodes et d'un étalon collectif par le Laboratoire de Métrologie Dynamique (LMD) de Arts et Métiers ParisTech. Les travaux de ce laboratoire ont amené au développement d'une méthode d'étalonnage et de calcul de l'incertitude jusqu'à la pression de 1 MPa (10 bar).

Cette thèse a comme objectif d'utiliser cette même méthode en hautes pressions (au-dessus de 1 MPa) ; c'est-à-dire, développer les moyens d'étalonnage et/ou faire des mises à jour des moyens déjà disponibles de façon à réduire les incertitudes. Cette thèse a été menée dans le cadre d'une collaboration entre le LMD de Arts et Métiers ParisTech et l'Université de Brasília.

Synthèses des travaux présentées en 2011 pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR)

LNE

Alexandre BOUNOUH – Conception et élaboration de composants microniques et submicroniques pour la métrologie électrique et l'instrumentation de précision. – Université Paul Sabatier, Toulouse III – *Génie électrique, électronique, télécommunications* – 25 novembre 2011.

Les travaux de recherche présentés dans le cadre de cette HDR abordent diverses thématiques autour de la métrologie électrique et de l'instrumentation de précision. Aussi, ce travail traite, en fonction du domaine de fréquence (du continu aux hautes fréquences), de phénomènes physiques aussi passionnants que l'effet Hall quantique, les couches ultra-minces métalliques ou les microsystèmes.

Le premier point d'intérêt concerne le développement de réseaux de résistances mettant en jeu un grand nombre de barres de Hall connectées en série ou en parallèle par la technique des multiples connexions. De véritables étalons quantiques ont été ainsi développés couvrant un large

intervalle de valeurs de résistance et permettant la généralisation de l'utilisation de l'effet Hall quantique dans la métrologie de l'ohm.

Ensuite, dans une perspective de détermination des constantes fondamentales de von Klitzing (R_K) et de structure fine (α), les travaux de recherche ont investi le domaine des résistances calculables en courant alternatif. Il s'agissait de maîtriser les propriétés électriques de couches métalliques ultra-minces d'épaisseur nanométrique pour réaliser des étalons primaires d'impédance dont les applications s'étendent aujourd'hui des basses fréquences jusqu'à 100 MHz.

Enfin, depuis quelques années, les travaux de recherche se sont orientés vers le domaine des micro-nanosystèmes (M-NEMS) pour développer des références de tensions alternatives (AC). Les résultats obtenus ont permis d'envisager l'extension du domaine d'application de ces microsystèmes aux tensions continues (DC), aux convertisseurs AC-DC, aux capteurs de puissance haute fréquence ou plus récemment à l'établissement d'une métrologie traçable des microsystèmes pour la récupération de l'énergie.

Tous ces travaux ont été réalisés dans le cadre de projets fédérateurs et concourent fortement au renforcement du positionnement du laboratoire au niveau européen. Ils constituent un atout pour mieux définir le cadre effectif de nos futurs projets de recherche en lien avec la convergence des visions stratégiques des laboratoires de métrologie européens qui impose des actions de coordination renforcées.

LNE-LNHB

Loïc LENOIR DE CARLAN – Mesure et modélisation anthropomorphique. – Université Paris 7 – *Physique* – 1^{er} juin 2011.

La surveillance dosimétrique du personnel de l'industrie nucléaire exposé au risque de contamination interne par des actinides en situation normale ou accidentelle est un problème majeur pour la radioprotection. La législation française fixe une limite de dose annuelle de 20 mSv, pour la somme des expositions interne et externe, à respecter dans le cadre de l'exposition professionnelle. Pour satisfaire aux exigences de la réglementation, il est nécessaire de mettre en place une surveillance individuelle adaptée.

Les recherches présentées ont été menées à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) dans le

but d'améliorer les moyens de surveillance individuelle des travailleurs susceptibles d'être exposés par contamination radioactive interne. Les recherches sont plus particulièrement centrées sur la mesure des actinides, éléments fortement radiotoxiques.

La problématique des mannequins anthropomorphes, également appelés fantômes physiques, pour l'étalonnage des systèmes de mesure est critique pour la mesure des actinides. Ces fantômes ne peuvent représenter, pour des raisons techniques, qu'une approximation de la géométrie de la personne à mesurer. Ces fantômes physiques étant déjà très sophistiqués, il était difficile de concevoir de nouveaux développements dans ce domaine. Grâce aux progrès réalisés en imagerie médicale et à l'évolution des performances des ordinateurs, des modèles plus réalistes des personnes ont pu être créés : les fantômes numériques voxélisés. Ils sont constitués par la juxtaposition des coupes tomographiques, le pixel « *picture element* » de l'image 2D devenant un voxel « *volume element* » par extension à la troisième dimension. Pour améliorer l'étalonnage en anthroporadiamétrie, la mesure peut être simulée à l'aide d'un fantôme voxélisé et du système de mesure modélisé couplé à un code de transport des particules dans la matière basé sur la méthode de Monte Carlo. Ce sont ces développements et l'application des fantômes numériques voxélisés qui représentent l'essentiel des travaux présentés. Le fil conducteur est donc l'approche par la modélisation qui vient en complément à l'évaluation dosimétrique par les moyens expérimentaux.