

Thèses de DOCTORAT de sciences soutenues en 2007

Ph.D thesis presented in 2007

Dans le cadre des programmes d'études en métrologie coordonnés par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), des travaux de thèses, en vue de l'obtention d'un Doctorat de sciences, sont effectués dans les laboratoires nationaux de métrologie ou les laboratoires associés au LNE. Les thèses soutenues en 2007 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-SYRTE

Fabien LIENHART – Etude d'un gravimètre à atomes froids embarquable. – Observatoire de Paris – *Astronomie et Astrophysique* – 17 janvier 2007.

L'interférométrie atomique permet de réaliser des capteurs inertiels absolus et de grande sensibilité. Un gravimètre embarquable présentant ces deux propriétés conjuguées serait exploitable dans de nombreuses applications : géologie, prospection pétrolière, guidage-navigation... Malheureusement, les dispositifs actuels de refroidissement atomique par laser sont trop sensibles aux perturbations environnementales. Le but de cette thèse est donc de développer des solutions robustes permettant le fonctionnement d'un gravimètre à atomes froids en conditions opérationnelles.

Dans un premier temps, une évaluation prospective des performances de l'instrument embarqué a été réalisée. Cette évaluation a permis le dimensionnement du prototype. Dans un deuxième temps, un banc optique permettant de refroidir des atomes de rubidium a été réalisé : ce dernier repose sur l'utilisation de sources fibrées à 1 560 nm, doublées en fréquence à l'aide de cristaux de niobate de lithium périodiquement polarisé (PPLN). L'ensemble du dispositif tient dans une baie d'électronique, et a permis d'obtenir un piège magnéto-optique, même en présence de vibrations mécaniques importantes et de fortes variations de température (de 10 °C à 25 °C en 30 min). Enfin, les faisceaux Raman ont été synthétisés à l'aide d'un modulateur électro-optique à 1 560 nm, et des tests préliminaires ont été menés sur les atomes refroidis.

François-Julien VERMERSCH – Vers une nouvelle source laser pour horloges atomiques : étude théorique et expérimentale d'un laser à contre réaction répartie

émettant à 852 nm, à faible largeur de raie, pour le pompage du césium. – Université Paris XI – *Ondes et Matière* – 18 janvier 2007.

Benjamin CANUEL – Étude d'un gyromètre à atomes froids. – Université Paris XI – *Laser et Matière* – 15 mars 2007.

Ces travaux constituent l'étude d'un capteur inertielle basé sur l'interférence d'ondes atomiques permettant d'effectuer des mesures simultanées de rotations et d'accélération. Contrairement aux appareils précédents, l'utilisation d'atomes refroidis par laser permet d'obtenir un dispositif compact et stable sur le long terme. Cet appareil utilise deux sources d'atomes de césium froids lancées dans des directions opposées sur des trajectoires paraboliques. Au sommet de cette trajectoire, les atomes interagissent avec des impulsions lasers induisant des transitions Raman stimulées (séquence d'impulsions $\pi/2-\pi-\pi/2$), afin de réaliser la séparation, la déflexion et la recombinaison des paquets d'ondes atomiques. A la sortie de l'interféromètre, le déphasage mesuré est proportionnel à l'accélération et à la vitesse de rotation de l'appareil. Ce signal de déphasage est également sensible à certaines imperfections expérimentales, qui peuvent dégrader la stabilité (bruit de phase des lasers, fluctuation du champ magnétique, bruit de vibration) ou l'exactitude de l'appareil (gradient de champ magnétique, défauts de trajectoires, déplacement lumineux), dont l'influence est déterminée. Les améliorations apportées aux sources atomiques concernant notamment le contrôle des trajectoires et la stabilité des mesures de déphasage obtenue dans des configurations utilisant des faisceaux Raman verticaux et horizontaux sont étudiées. Dans ce dernier cas les sensibilités atteintes sont respectivement de $3,5 \cdot 10^{-7}$ rad·s⁻¹ et $8 \cdot 10^{-7}$ m·s⁻² sur 1 s pour des mesures de rotation et d'accélération. Une première étude de l'exactitude des mesures est également présentée en utilisant la rotation de la Terre.

Rodolphe LE TARGAT – Horloge à réseau optique au Strontium : une 2^e génération d'horloges à atomes froids. – ENST – *Electronique et Communication* – 13 juillet 2007.

Les fontaines atomiques, basées sur une transition micro-onde du Césium ou du Rubidium, constituent l'état de l'art des horloges atomiques, avec une exactitude relative avoisinant 10^{-16} . Cependant, il apparaît clairement aujourd'hui qu'il sera difficile de dépasser significativement ce niveau de performance avec un dispositif de ce type.

L'utilisation d'une transition optique, toutes choses étant égales par ailleurs, ouvre la perspective d'une amélioration de 4 ou 5 ordres de grandeur de la stabilité et de l'incertitude relative sur la plupart des effets systématiques. Les effets liés au mouvement des atomes peuvent être, quant à eux, contrôlés d'une façon totalement différente, en les piégeant dans un réseau optique pour éviter la phase de vol balistique caractéristique des fontaines. Le point clef de cette approche réside dans le fait que les paramètres de ce piège peuvent être ajustés de façon à s'affranchir du déplacement lumineux si l'on sélectionne une transition d'horloge faiblement permise $J = 0 - J = 0$.

A cet égard, l'atome de strontium est l'un des candidats les plus prometteurs, la transition $^1S_0 - ^3P_0$ présente une largeur naturelle de 1 mHz, et plusieurs autres transitions facilement accessibles peuvent être utilisées en vue d'un refroidissement laser efficace des atomes jusqu'à une température de 10 μ K. Ces travaux d'une part démontrent la faisabilité expérimentale d'une horloge à réseau optique basée sur l'atome de strontium, et d'autre part exposent une évaluation préliminaire de l'exactitude relative avec l'isotope fermionique ^{87}Sr , à un niveau de quelques 10^{-15} .

François NARBONNEAU – Dissémination ultra-stable d'étalons de fréquence par fibre optique du réseau telecom métropolitain. – Université Rennes I – *Physique de la Matière* – 15 octobre 2007.

Pour des applications liées à la métrologie Temps-Fréquence comme pour des mesures de physique fondamentale, l'utilisation d'oscillateurs bas bruit et de haute stabilité est essentielle. La mise en œuvre et le coût d'exploitation de tels oscillateurs sont tels qu'ils restent inaccessibles pour la plupart des utilisateurs, ce qui freine la réalisation d'expériences de très haute résolution. Actuellement, les comparaisons d'horloges à distance sont effectuées soit par GPS, soit par satellite de télécommunications. Cependant, les comparaisons sont limitées en stabilité relative à quelques 10^{-15} pour un jour de mesure, donc insuffisantes pour les performances ultimes des étalons atomiques micro-ondes et *a fortiori* pour les horloges optiques.

Profitant de la redondance du réseau fibré de télécommunication métropolitain, un dispositif de dissémination de références de fréquence par fibres optiques a été développé en collaboration avec le Laboratoire de Physique des Lasers (Université Paris 13/ Institut Galilée). Ce dispositif est complété par un système

actif électronique permettant la compensation des fluctuations de phase ajoutées lors du transfert sur fibre (vibrations mécaniques, fluctuations thermiques, effets non-linéaires dans la fibre...). Ainsi, il a été démontré la possibilité de transférer un signal de référence à 1 GHz, par modulation d'amplitude d'une porteuse optique à 1 550 nm, avec des instabilités relatives de fréquence de l'ordre de $2 \cdot 10^{-15}$ à $3 \cdot 10^{-15}$ pour une seconde de temps d'intégration et quelques 10^{-18} sur la journée, sur une distance de 86 km (quelques 10^{-14} r^{-1} sur environ 200 km). Il est alors possible de comparer des fontaines atomiques de performances égales à celles du LNE-SYRTE sur quelques centaines de kilomètres. Une nouvelle méthode, « tout optique », en cours d'étude, a pour but de transférer directement une référence optique sur des distances pouvant aller jusqu'à 1 000 km dans la perspective de comparer des horloges optiques et de constituer un réseau fibré européen.

LNE-CMSI

Barthélémy STECK – Application en métrologie électrique de dispositifs monoélectroniques : vers une fermeture du triangle métrologique. – Université de Caen – *Electronique et micro-électronique* – 28 novembre 2007.

Dans l'optique d'une modification du Système international d'unités (SI), le LNE développe l'expérience du triangle métrologique (ETM). Cette expérience consiste à appliquer la loi d'Ohm à l'aide des effets Hall quantique pour la résistance, Josephson pour la tension et tunnel à un électron (SET) pour le courant. L'objectif est d'augmenter la connaissance de la cohérence des constantes impliquées dans ces phénomènes. Dans ce cadre, ces travaux se sont intéressés à la possibilité d'utiliser les pompes à électrons de type R à 3 jonctions de façon métrologique autour de 10 pA. Le montage expérimental est conçu afin de mesurer le courant quantifié généré par le dispositif en utilisant un comparateur cryogénique de courants (CCC). Les principaux résultats ont été obtenus avec une pompe fabriquée par la PTB couplée à un CCC connecté en contre-réaction interne, *i.e.* utilisé comme un amplificateur de courant et ne donnant qu'une valeur relative du courant. Ces expériences ont permis de montrer l'existence de marches de courant jusqu'à environ 16 pA et une stabilité du courant généré par le dispositif sur des temps longs, indépendamment de la fréquence de pompage jusqu'à 100 MHz. Le niveau de bruit blanc est de $10^{-15} \text{ fA/Hz}^{1/2}$ et, après 7 h de mesure à une fréquence de 100 MHz, une incertitude relative de type A de $4 \cdot 10^{-6}$ a été atteinte. La dernière partie de ce travail présente la première réalisation directe de l'ETM. Dans ce cas, le courant généré par la pompe traverse une résistance étalonnée et la tension aux bornes de celle-ci est comparée à la tension délivrée par un réseau Josephson. Les premiers résultats qui sont présentés semblent prometteurs.