

nouvelle ligne de production en Chine en collaboration avec la société Simgui. C'est une véritable réussite commerciale pour SOITEC se basant sur le transfert de résultats fondamentaux issue de notre laboratoire de recherche.

En 2013, un de nos anciens chercheurs, le Dr. Mostafa Emam, a créé une *spin-off* valorisant les compétences en terme de caractérisation, de modélisation et de conception dans le domaine RF SOI. Cette société est appelée Incize (www.incize.com).

Conclusion

L'introduction de défauts d'interface en-dessous du BOX d'une tranche SOI pour améliorer les performances RF de celle-ci est une solution très disruptive et tout à fait inattendue. En effet, la communauté scientifique a toujours vu ces défauts aux interfaces oxyde-semi-conducteur comme un problème à combattre dans la définition d'un dispositif électronique de qualité. Notre équipe exploite aujourd'hui ce concept pour la réduction des couplages parasites dans le domaine de l'intégration tri-dimensionnelle (*3D integration*) de circuits électroniques intégrés. L'intégration tri-dimensionnelle est une des solutions afin de conserver l'augmentation du niveau d'intégration des circuits électroniques vu les difficultés de plus en plus grandes à toujours réduire la taille des transistors tout en conservant leur bon fonctionnement.



Jean-Pierre Raskin est né à Aye, Belgique, en 1971. Il obtient un diplôme d'ingénieur industriel de l'Institut supérieur industriel d'Arlon, en 1993, et les diplômes de master et PhD en sciences appliquées en 1994 et 1997. En 1998, il rejoint le EECS Department of The University of Michigan, Ann Arbor,

USA, où il travaille sur le développement et la caractérisation de dispositifs micro-usinés (MEMS) pour applications dans le domaine des ondes millimétriques. En 2000, il est nommé professeur à l'Université catholique de Louvain, Belgique. Il est le président du Electrical Engineering Department de l'UCL depuis 2014. Son domaine d'expertise est la caractérisation large bande et la modélisation de dispositifs en technologie SOI et l'étude des propriétés intrinsèques des matériaux à l'échelle nanoscopique à l'aide de lab-on-chip en technologie MEMS.

Capteurs inertiels à atomes froids : principe et applications

REMI GEIGER

MAÎTRE DE CONFÉRENCES À L'UNIVERSITÉ

PIERRE ET MARIE CURIE

PRIX EDOUARD BRANLY 2015

Le **Prix Edouard Branly** récompense un jeune chercheur pour des travaux de recherches remarquables dans le domaine des sciences physiques, notamment celui des ondes. Il permet de reconnaître des travaux de recherche de grande qualité, effectués dans l'esprit des travaux de ce savant qui a su associer recherche fondamentale et applications.

L'association des amis d'Édouard Branly et la F2S (Fédération Française de Sociétés scientifiques, dont la SEE) se sont associées pour assurer la pérennité du prix.

Introduction

Les capteurs inertiels sont des instruments capables de déterminer les accélérations et rotations auxquelles sont soumis un objet, et présentent de nombreuses applications. Embarqués à bord d'un mobile en mouvement (avion, bateau, sous-marin), ils permettent son positionnement dans le temps à partir de l'intégration des lois du mouvement, et ce de manière autonome (sans communication avec un tiers, contrairement au positionnement par satellite par exemple). Une seconde application est celle des géosciences où l'on utilise des capteurs inertiels pour mesurer l'accélération de la pesanteur (la valeur locale de g) ou la vitesse de rotation de la Terre. Ces grandeurs sont liées à la physique du globe, notamment à la distribution de masse de la Terre. Le suivi de leurs variations à différentes échelles de temps (de la seconde à plusieurs décennies) nous renseigne sur l'évolution géophysique de notre planète. Enfin, des capteurs inertiels très sensibles permettent de tester les lois fondamentales de la physique, notamment les postulats et conséquences de la théorie de la relativité générale. L'amélioration des performances (sensibilité, exactitude, stabilité, compacité, transportabilité, etc.) des capteurs inertiels profite donc à de nombreux domaines scientifiques et sociétaux.

Une voie prometteuse d'amélioration de la sensibilité et de l'exactitude des capteurs inertiels est celle utilisant la technologie des atomes froids dans un interféromètre atomique. Cet article présente de manière succincte leur principe de fonctionnement, ainsi que des résultats expérimentaux montrant le fort potentiel de cette technologie issue de la recherche fondamentale en physique atomique.

Principe d'un capteur inertiel à atomes froids

De manière très simplifiée, le principe d'un capteur inertiel à atomes froids peut être vu comme une mesure de la distance parcourue par un nuage d'atomes refroidis.

dis (c-à-d ralentis) durant un intervalle de temps donné. La mesure de distance est effectuée à l'aide d'une règle laser dont le pas est donné par la longueur d'onde λ_{laser} (typiquement 500 nm). Le laser est lié au référentiel en mouvement (uniformément accéléré par exemple) et se déplace par rapport au nuage d'atomes en chute libre, d'où une mesure possible de l'accélération relative laser/nuage d'atomes. Ce principe est illustré par la figure 1. Cette description simpliste donne le facteur d'échelle du capteur : le nombre de graduations parcourues par le nuage d'atomes est égal à $aT^2 / \lambda_{\text{laser}}$ où a est l'accélération du référentiel et T le temps de chute. En supposant un rapport signal sur bruit de 100 sur la mesure de distance (sensibilité à des variations de distance de $\lambda_{\text{laser}}/100$), et un temps de chute typique de 100 millisecondes, la sensibilité aux accélérations du capteur est de l'ordre de 10^{-7} m.s^{-2} . Un tel niveau de sensibilité est très intéressant pour les applications mentionnées précédemment.

Le principe décrit ci-dessus et utilisant des concepts de mécanique classique est en réalité erroné. Comprendre plus précisément le principe du capteur nécessite de recourir à une description de l'atome par la physique quantique, la mesure d'accélération résultant d'un processus d'interférences d'ondes de matière. Nous nous contenterons de l'explication simpliste dans cet article. Le lecteur se reportera à la bibliographie pour une description plus détaillée [1].

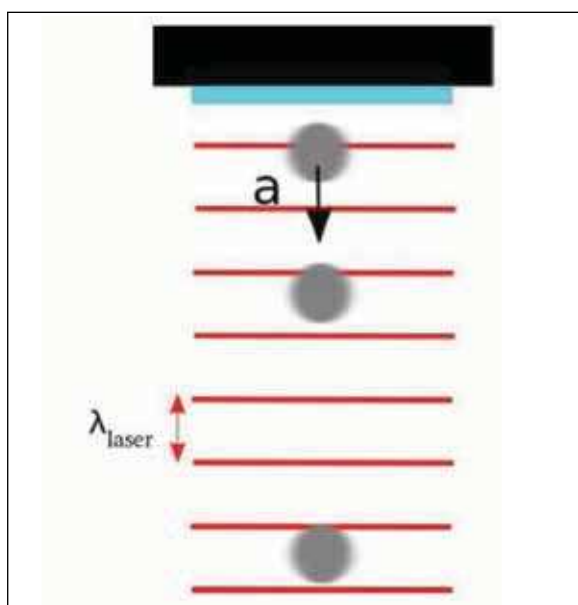


Figure 1: Principe simplifié d'un capteur inertielle à atomes froids. Un nuage d'atomes froids (boule grise) est interrogé par un laser (traits rouges) mesurant sa position au cours du temps et permettant ainsi de remonter à l'accélération du référentiel de l'expérience par rapport au nuage d'atomes.

La sensibilité du capteur augmentant comme T^2 , il est important de pouvoir interroger le nuage d'atomes pendant le temps le plus long possible. Il est ainsi nécessaire de ralentir les atomes à des vitesses de l'ordre de quelques centimètres par seconde pour les suivre pendant une centaine de millisecondes. De telles faibles vitesses d'agitation thermique correspondent à des températures de l'ordre du micro-Kelvin et peuvent être obtenues en refroidissant (ralentissant) les atomes avec des lasers. La physique très riche des atomes froids s'est considérablement développée depuis les années 1980 [2], permettant des applications comme celles des capteurs inertiels à atomes froids développés à partir des années 1990.

Le gravimètre atomique du laboratoire SYRTE

Il est possible de réaliser un gravimètre à atomes froids basé sur le principe décrit précédemment. On mesure dans ce cas l'accélération de la pesanteur locale (au niveau de l'expérience) grâce à des lasers se propageant verticalement. Le schéma du dispositif de gravimètre développé au laboratoire SYRTE est représenté en figure 2.

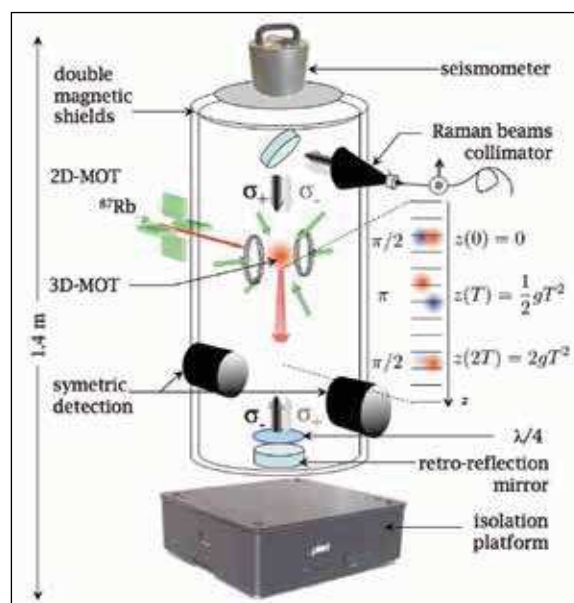


Figure 2 : Schéma du dispositif de gravimètre à atomes froids du laboratoire SYRTE, utilisant des atomes de rubidium 87 refroidis par laser.

Les atomes (boule rouge) sont refroidis et piégés à l'aide de lasers (faisceaux verts) et d'un champ magnétique (créé par les bobines grises), au centre d'une enceinte présentant un niveau de vide de 10^{-10} mBar. Les lasers permettant de réaliser l'interféromètre atomique (la « règle » laser) se propagent verticalement et sont re-

présentés en gris avec les symboles $\sigma^{+/-}$ (indiquant leur polarisation). Ils sont injectés dans le dispositif ultravide à l'aide d'un collimateur optique (*Raman beam collimator*) et d'un miroir, puis rétro-réfléchis en bas de l'expérience par un second miroir (*retro-reflection mirror*). C'est ce second miroir qui constitue la référence de phase optique, ses déplacements déterminant le « pas » de la règle laser utilisée pour la mesure de gravité. En raison du bruit de vibration du sol (bruit sismique), les déplacements de ce miroir créent du bruit sur la mesure. Pour limiter ce bruit, deux outils sont utilisés : une plate-forme antivibratoire filtrant les vibrations aux fréquences supérieures à environ 1 Hz, et un sismomètre (en haut) enregistrant les vibrations et permettant de les soustraire de la mesure. Enfin, les atomes sont détectés à l'aide de photodiodes collectant la lumière de fluorescence obtenue en allumant des lasers (*symetric detection*). La chambre à vide est enfermée dans un double blindage magnétique en mu-métal permettant de réduire (d'un facteur 100 environ) l'influence des champs magnétiques extérieurs pouvant perturber les niveaux quantiques de l'atome, et donc la mesure de gravité.



Figure 3 : Gravimètre transportable développé par le laboratoire SYRTE. Les dimensions sont en centimètres.

La figure 3 présente une photographie de l'ensemble de l'expérience. Au premier plan se trouve la chambre de science dans le blindage magnétique, et au second plan l'électronique de contrôle et le banc laser. La puissance électrique nécessaire pour l'expérience est d'environ 1 kW.

Après environ 10 ans de développement, le gravimètre du SYRTE représente l'état de l'art des gravimètres absolus, au même niveau d'exactitude ($3 \times 10^{-9} g$) que les gravimètres « à coin de cube » (l'autre technologie dis-

ponible basée sur l'interférométrie optique). La figure 4 présente un signal de gravité typique enregistré par l'instrument, montrant les fluctuations diurnes de g associées aux marées lunisolaires.

Un transfert technologique a été entrepris à partir de 2011 et s'est concrétisé par la création de la société μquans basée en Aquitaine. Celle-ci a commercialisé en 2015 un premier modèle de gravimètre à atomes froids [3], pour des applications en géosciences. Un tel transfert a été rendu possible grâce aux recherches fondamentales et au développement instrumental conduits notamment au SYRTE dans le domaine des atomes froids et de l'interférométrie atomique durant les 20 dernières années.

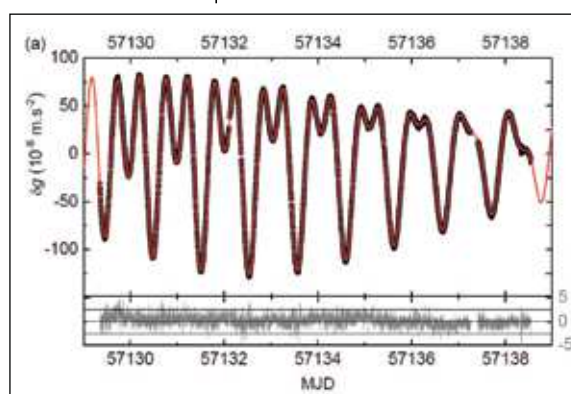


Figure 4 : Variations de gravités mesurées par le gravimètre durant plusieurs jours. Les points noirs sont les données expérimentales, et la courbe rouge un modèle théorique. Les oscillations sont dues aux marées lunisolaires. Le graphe du bas représente les résidus indiquant une sensibilité de l'ordre de 2 nm.s^{-2} .

Conclusion : vers des capteurs inertiels quantiques ultra-sensibles

Un effort de recherche important est actuellement mené par plusieurs laboratoires dans le monde (dont le SYRTE) pour améliorer les performances des capteurs inertiels à atomes froids, notamment leur sensibilité. Ces améliorations permettront l'utilisation de ces instruments en géosciences pour des mesures très précises de la rotation de la Terre (à un niveau de $10^{-13} \text{ rad.s}^{-1}$), ou des mesures sur Terre ou satellitaires de gradients de gravité (au niveau de 10^{-12} s^{-2}), avec des applications en hydrologie [5]. Ils trouveront également des applications en physique fondamentale, notamment pour des tests du principe d'universalité de la chute libre (comparaison de l'accélération relative de deux atomes différents au niveau de $10^{-15} \text{ m.s}^{-2}$) ou être utilisés pour la détection d'ondes gravitationnelles [4]. Enfin, le développement des capteurs inertiels quantiques pourrait ouvrir la voie à une révolution dans le domaine de la navigation

inertielle, en réduisant de plusieurs ordres de grandeur la dérive de position due aux capteurs existants [6].

Références

- [1] *Des ondes de matière pour tester les lois de l'Univers*, R. Geiger, V. Ménoret, P. Bouyer Pour la Science n° 409 (Nov. 2011).
- [2] *Atomes froids et condensats quantiques*, David Guéry-Odelin et Jean Dalibard, Pour La Science n° 53 (Dec. 2006).
- [3] μ Quans Absolute Quantum Gravimeter, <http://www.muquans.com/index.php/products/aqg>
- [4] *Low frequency gravitational wave detection with ground-based atom interferometer arrays*, W. Chaibi, R. Geiger, B. Canuel, A. Bertoldi, A. Landragin, and P. Bouyer Phys. Rev. D 93, 021101(R), 2016.
- [5] R. Geiger et al, "*Matter-wave laser Interferometric Gravitation Antenna (MIGA): New perspectives for fundamental physics and geosciences*", Proceedings of the 50th Rencontres de Moriond, La Thuile (Italy), 21-28 March 2015, arXiv:1505.07137.
- [6] R. Geiger et al, "*Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry*", Nature Communications 2, 474 (2011).



Remi Geiger est maître de conférences à l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6) depuis 2013, et conduit ses recherches au laboratoire Systèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE) de l'Observatoire de Paris. Diplômé en 2008 de l'Ecole supérieure d'électricité (Supélec) après une spécialisation en physique théorique à l'université Technologique de Berlin, il a effectué sa thèse de doctorat à l'université Paris Sud au sein du laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique (Palaiseau). Il a ensuite été chercheur postdoctorant de 2011 à 2013 à l'université Technologique de Vienne (Autriche).