

Offre de Thèse CIFRE : Horloge atomique à cellule de Cs compacte de haute-performance

Les horloges atomiques sont des composants clés des systèmes modernes. Elles sont au cœur d'expériences scientifiques pointues mais servent également à des applications qui touchent le grand public comme la définition de la seconde, du temps atomique international (TAI), la synchronisation des réseaux télécom (communications, transactions bancaires, ...) ou encore l'évaluation de la position (GPS, Galiléo).

Par leur potentiel à combiner un volume réduit, une faible puissance de consommation et une stabilité relative de fréquence journalière supérieure à celle des oscillateurs à quartz, les horloges atomiques à cellule, dont la famille la plus largement connue est celle des horloges à Rb [1,2], sont des candidates très attractives pour de nombreuses applications.

Au cours des dernières années, s'appuyant sur l'exploitation de diodes lasers à faible largeur spectrale et l'exploitation de protocoles d'interrogation originaux, des progrès significatifs ont conduit à la démonstration en laboratoire d'horloges atomiques microondes à cellule de nouvelle génération [3-5], exhibant des performances de stabilité de fréquence 100 fois supérieures à celles des horloges Rb commerciales actuelles, tout en conservant un potentiel de compacité important.

Dans ce cadre, le laboratoire FEMTO-ST (www.femto-st.fr) développe depuis plusieurs années une horloge atomique compacte à cellule de césium de haute stabilité basée sur le phénomène de piégeage cohérent de population (CPT) [6]. Cette horloge combine une diode laser à 895 nm (raie D1 du césium), un modulateur électro-optique fibré piloté par un oscillateur local ultra-stable, un modulateur acousto-optique, une cellule à vapeur de césium disposée au sein d'un module physique et une électronique de contrôle FPGA de haute performance. Cette horloge, associant un schéma de polarisation CPT optimisé [7,8] et une technique d'interrogation avancée nommée Auto-Balanced Ramsey (ABR) [9], a démontré en laboratoire des performances de stabilité de $2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ (avec τ le temps d'intégration de la mesure), atteignant sur une durée de mesure limitée le niveau de $2 \cdot 10^{-15}$ à 10^4 s [11,12], record pour une horloge de ce type.

Malgré ces résultats encourageants, une grande majorité d'applications requiert de valider le potentiel de stabilité de fréquence de ce type d'horloge pour des temps d'intégration plus longs, supérieurs à 10^4 s. Des efforts métrologiques conséquents restent ainsi à mener pour comprendre quels mécanismes limitent les performances de l'horloge sur de longs temps d'intégration, proposer des solutions scientifiques et technologiques pour tacler ces effets sur des temps d'intégration au-delà de 10^4 s, et explorer les performances ultimes de ce type d'horloge. Ces efforts métrologiques devront être accompagnés d'effort de compacité et d'intégration accrus de l'horloge, qui assureront une réduction de la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations environnementales et permettront ainsi d'évaluer les perspectives offertes par cette technologie.

Références bibliographiques:

- [1] J. Camparo, The Rubidium atomic clock and basic research, *Physics Today*, pp 33–39, American Institute of Physics, Washington (2007)
- [2] J. Camparo, Past, present and future of atomic clocks for GNSS, *GPS solutions* 25, 27 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01059-x>
- [3] S. Micalizio et al., *Metrologia* 49, 425 (2012).
- [4] N. Almat et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 67, 1, 207 (2020).
- [5] P. Yun et al., *Phys. Rev. Applied* 7, 014018 (2017).
- [6] J. Vanier, *Appl. Phys. B* (2005). <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1905-3>
- [7] Y. Y. Jau et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 160802 (2013).
- [8] X. Liu et al., *Phys. Rev. A* 87, 013416 (2013).
- [9] C. Sanner et al., *Phys. Rev. Lett.* 120, 053602 (2018).
- [10] M. Abdel Hafiz et al., *Phys. Rev. Appl.* 9, 064002 (2018).
- [11] M. Abdel Hafiz et al., *Appl. Phys. Lett.* 112, 224102 (2018).
- [12] M. Abdel Hafiz et al., *Phys. Rev. Appl.* 14, 034015 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.034015>

Description du travail de thèse proposé

Le sujet de la thèse s'inscrit dans le contexte décrit ci-dessus. Cette thèse CIFRE, à la frontière recherche-industrie, implique la contribution de Thales AVS-MIS et le laboratoire FEMTO-ST, et s'inscrit dans un programme ambitieux visant à permettre la valorisation industrielle et le déploiement futur d'une horloge atomique à cellule de césium CPT de haute performance.

L'objectif majeur de la thèse sera d'explorer, par le biais d'une caractérisation métrologique poussée et de travaux de réduction de volume de l'horloge, les performances ultimes de ce type d'horloge sur des temps d'intégration supérieurs à 10 000 s.

FEMTO-ST et Thales AVS-MIS

Cette thèse CIFRE, à la frontière recherche-industrie, implique la contribution de Thales AVS-MIS et le laboratoire FEMTO-ST. Le (la) candidat(e) sera rattaché(e) à l'Ecole Doctorale SPIM de l'Université Bourgogne Franche-Comté (<https://spim.ubfc.fr/>).

Profil recherché :

Le (la) candidat(e) doit être titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou Master 2. Il (elle) doit porter un intérêt majeur pour la physique appliquée et sciences pour l'ingénieur en général, la physique expérimentale et un goût marqué pour les mesures de précision. Une expérience (stage, travaux pratiques au cours de la formation) avec la conception et simulation mécanique-thermique-magnétique de systèmes sera un vrai point fort. De bonnes connaissances en électronique (analogique-numérique), instrumentation, programmation pour le pilotage d'expérience (langage Python fortement souhaité), optique sont des requis importants. Des connaissances dans les domaines de la physique atomique sont un véritable atout. Il (elle) doit apprécier le travail en équipe.

Le (la) candidat(e) cherchera à valoriser ces travaux par des brevets, publications scientifiques et présentations à des conférences internationales.

Contacts :

Rodolphe Boudot
Chargé de Recherche CNRS, HDR
FEMTO-ST, Dpt Temps-Fréquence
Site ENSMM
26 rue de l'épitaphe
25030 Besançon cedex.
rodolphe.boudot@femto-st.fr
Tel : +33 (0)3 81 40 28 56

Oriane Lelièvre
THALES
2, rue Marcel Dassault
78140 Vélizy-Villacoublay
oriane.lelievre@thalesgroup.com