



JCOM 2025
12 juin 2025
LAAS Toulouse



Micro-horloge atomique CPT à régime d'interrogation impulsif avec stabilité de fréquence de 2.5×10^{-12} à 10^5 s

Carlos-Manuel Rivera-Aguilar, Andrei Mursa, Clément Carlé, Jean-Michel Friedt, Emmanuel Klinger, Moustafa Abdel Hafiz, Nicolas Passilly, Rodolphe Boudot
FEMTO-ST, CNRS, Supmicrotech, Université Marie et Louis Pasteur, 26 chemin de l'épitahe 25030 Besançon
Contact: carlos.rivera@femto-st.fr

La convergence de la spectroscopie atomique, des technologies de microfabrication et des lasers type VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) a conduit à l'émergence, au développement puis à la commercialisation de micro-horloges atomiques [1]. Ces horloges atomiques microondes, reposant sur le phénomène quantique de piégeage cohérent de population (CPT), trouvent application pour la synchronisation de réseaux de capteurs dans les fonds océaniques, la navigation, le guidage, ou la sécurisation des communications. Dans ces dispositifs, la transition d'horloge d'atomes alcalins, confinés sous forme de vapeur thermique dans une cellule micro-fabriquée et mélangés à une pression de gaz tampon, est sondée par un signal microonde porté optiquement, obtenu par modulation directe du courant d'injection de la diode laser.

La stabilité relative de fréquence des micro-horloges CPT est généralement dégradée pour des temps d'intégration supérieurs à 100 s par les déplacements lumineux (sensibilité de la transition atomique d'horloge aux variations de puissance laser, fréquence laser, ou de puissance microonde). Plusieurs approches ont été proposées pour atténuer ces effets. Une technique largement utilisée consiste à ajuster finement la puissance micro-onde pour annuler au premier ordre la dépendance de la fréquence d'horloge aux variations de puissance laser [2-3]. Néanmoins, cette méthode rend la fréquence d'horloge seulement immune aux variations de puissance laser. D'autres techniques, telles que la mise en œuvre d'algorithmes avancés de compensation du couple courant-température laser [4], ou de séquences d'interrogation basées sur la modulation de puissance du laser [5], ont été proposées.

Une approche alternative pour la réduction des déplacements lumineux est la spectroscopie Ramsey-CPT. Dans ce cas, les atomes n'interagissent plus continuellement avec la lumière mais avec une séquence d'impulsions optiques CPT, de durée T_b et séparées par un temps d'évolution libre T dans le noir. Des variantes avancées, telles que la méthode Symmetric Auto-Balanced Ramsey (SABR), ont même démontré une efficacité accrue pour réduire l'impact néfaste des déplacements lumineux [6-7]. Dans [8], une horloge à microcellule CPT avec une stabilité de fréquence journalière dans la gamme basse des 10^{-12} a été démontrée.

Néanmoins, dans tous les travaux mentionnés ci-dessus, la séquence impulsif optique CPT était obtenue grâce à l'utilisation d'un obturateur optique externe, typiquement un modulateur acousto-optique (AOM). Or, l'utilisation d'un AOM, de par son volume et sa puissance de consommation, est parfaitement incompatible avec la démonstration d'une micro-horloge atomique pleinement intégrée et basse consommation.

Dans ce travail, nous présentons, dans la continuité de [9], une micro-horloge atomique CPT de haute-stabilité, exploitant la méthode d'interrogation impulsif SABR, sans AOM. La séquence d'interrogation, reposant sur l'utilisation d'impulsions à 2 étages, est obtenue par modulation directe, via son courant d'injection, de la puissance de sortie de la VCSEL. La génération de la séquence, l'acquisition du signal atomique, et l'implémentation des boucles d'asservissement nécessaires au bon comportement de l'horloge, sont assurées par une carte FPGA unique. Un point clé pour l'obtention des performances de stabilité fut l'implémentation d'une méthode de suivi et d'ajustement en temps-réel de la fenêtre de détection du signal atomique, fenêtre de détection sujette à une gigue temporelle en raison des transitoires thermiques de la diode VCSEL induits par les sauts de courant appliqués.

La sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations de puissance laser, puissance microonde et fréquence laser a été mesurée avec cette approche, démontrant des coefficients de sensibilité inférieurs à ceux obtenus en régimes continu ou Ramsey-CPT. La déviation d'Allan de l'horloge est mesurée au niveau de 8×10^{-10} à 1 s, s'intégrant jusqu'à 2.5×10^{-12} à 10^5 s [10]. Ces résultats de stabilité journalière, à l'état de l'art pour des horloges microondes à microcellule, sont prometteurs pour l'avènement de micro-horloges atomiques CPT de nouvelle génération, opérant en régime d'interrogation impulsionnel, aux performances de stabilité augmentées.

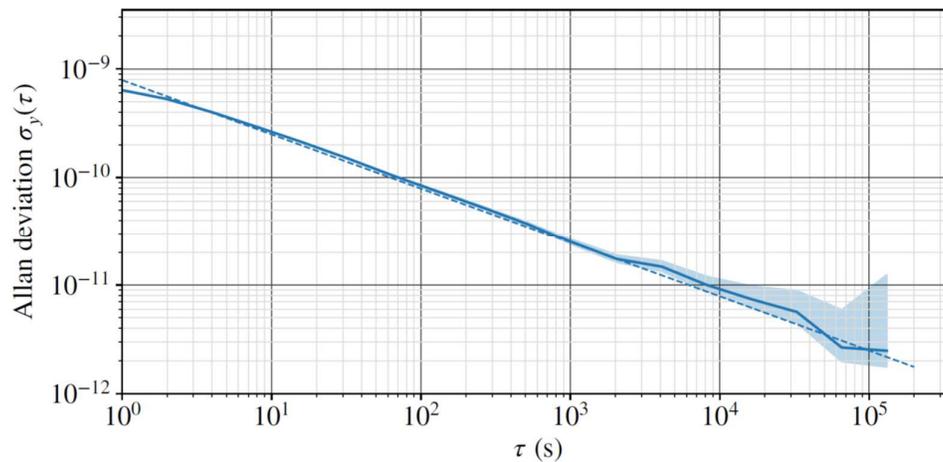


Figure 1 : Stabilité de fréquence de l'horloge à microcellule SABR-CPT. La séquence SABR-CPT est générée sans ajout d'obturateur optique externe.

Références :

- [1] J. Kitching, Appl. Phys. Rev. 5, 031302 (2018).
- [2] V. Shah et al., Appl. Phys. Lett. 89, 151124 (2006).
- [3] S. Zhang et al., J. Opt. Soc. Am. B 33, 1756 (2016).
- [4] S. Yanagimachi et al., Appl. Phys. Lett. 116, 104102 (2020).
- [5] M. Abdel Hafiz et al., Phys. Rev. Appl. 14, 034015 (2020).
- [6] M. Abdel Hafiz et al., Appl. Phys. Lett. 112, 244102 (2018).
- [7] M. Abdel Hafiz et al., Appl. Phys. Lett. 120, 064101 (2022)
- [8] C. Carlé et al., Opt. Exp. 31, 8160 (2023).
- [9] C. Rivera-Aguilar et al., Appl. Phys. Lett. 124, 114102 (2024).
- [10] C. Rivera-Aguilar et al., submitted Phys. Rev. Applied (2025).