

Mesures de déplacements de fréquence dans une horloge atomique CPT à cellule de césium haute performance

J. Breurec^{1,2}, M. Abdel Hafiz¹, R. Vicarini¹, C.E. Calosso³, O. Lelièvre², R. Boudot¹

¹FEMTO-ST, CNRS, UBFC, ENSMM, Besançon, France

²Thales AVS-MIS, 2 Rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, France

³INRIM, Strada delle Cacce 91, Torino, Italie

Les horloges micro-ondes à cellule combinent de bonnes performances en matière de stabilité et une aptitude à la compacité ainsi qu'à la faible consommation. Dans ce domaine, le piégeage cohérent de population (CPT) constitue une approche compétitive pour obtenir des niveaux de stabilité court-terme de l'ordre de quelques 10^{-13} à 1 s [2-4] comparables aux performances des horloges à double résonance en Rb continu ou à pompage optique pulsé (POP) [5]. Ce sont des candidates attractives pour être déployées dans une multitude d'applications telles que les systèmes de communication ou de navigation [1]. La stabilité des horloges CPT compactes est néanmoins souvent dégradée après 100 s par des effets de déplacement lumineux. Pour atténuer cette contribution, la mise en œuvre de séquences composites pulsées est efficace. La séquence dite Symmetric Auto-Balanced Ramsey (SABR) [6] a permis de démontrer qu'une horloge CPT pouvait entrer dans la plage de stabilité sub- 10^{-14} après quelques centaines de secondes. Ces résultats n'ayant été démontrés que sur des durées d'acquisition limitée, des mesures sur des temps plus longs sont nécessaires. Nous proposons ainsi ici une étude détaillée de la sensibilité de la fréquence d'horloge à de nombreux paramètres expérimentaux afin d'identifier les contributions principales à la stabilité d'horloge et explorer les performances ultimes qu'une telle horloge pourrait atteindre pour des temps d'intégration de l'ordre de la journée.

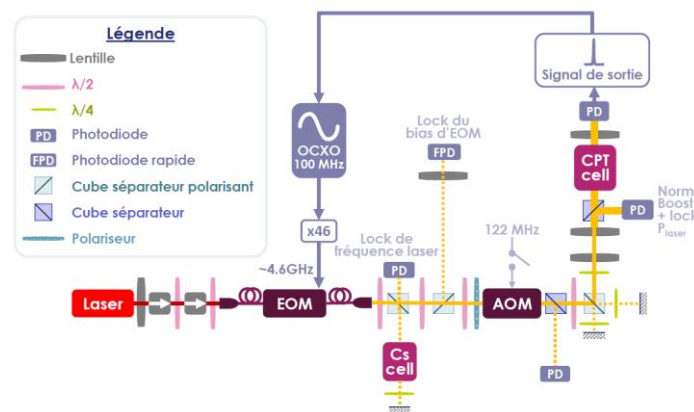


Figure 1. Architecture de l'horloge atomique CPT à cellule de vapeur de césium de FEMTO-ST.

La Figure 1 montre un schéma simplifié de l'architecture de l'horloge CPT réalisée à FEMTO-ST. L'horloge combine un schéma d'interrogation dit « push-pull optical pumping » (PPOP) permettant la détection de résonances CPT à fort contraste [7,8] et une séquence d'interrogation SABR impulsionnelle. Le banc optique combine une diode laser DFB, un modulateur électro-optique (EOM) modulé par un oscillateur local faible bruit [9] à 4,596 GHz, un étage de stabilisation de la fréquence du laser utilisant une technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence [10], un modulateur acousto-optique (AOM), un étage de type Michelson pour générer le schéma de polarisation PPOP, et un télescope pour augmenter le diamètre du faisceau. Le champ laser de sortie est envoyé dans une cellule de vapeur de Cs remplie de gaz tampon, tandis que la lumière transmise, détectée par une photodiode, est utilisée par l'électronique pour piloter l'horloge. La stabilité court-terme de la fréquence de l'horloge est mesurée à 1×10^{-13} à 1 s dans le régime Ramsey-CPT, et à 2×10^{-13} à 1 s dans le cas SABR-CPT.

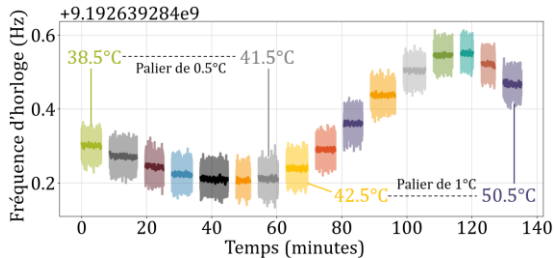


Figure 2. Changement de la fréquence d'horloge avec 16 palier de T_{AOM} , en SABR-CP avec $T_s = 1$ ms, $T_L = 4$ ms [2].

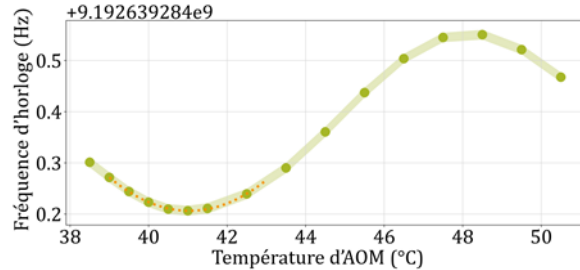


Figure 3. Fréquence d'horloge en fonction de la température d'AOM. Courbe extraite de la Figure 2. Points d'inversion observés à 41.1°C et 48.2°C

La Figure 2 montre l'exemple d'une séquence temporelle dans laquelle la fréquence de l'horloge est modifiée par paliers de température de l'AOM. Cela permet d'extraire la dépendance de la fréquence de l'horloge à la température de l'AOM, illustrée en Figure 3. Sur cette courbe, des points d'inversion peuvent être identifiés. En ces points, la dépendance de la fréquence de l'horloge est annulée au premier ordre, ce qui donne localement une courbure, en valeur relative, d'environ $3 \times 10^{-12} \text{ K}^{-2}$. L'approche expérimentale détaillée ici a été répétée pour un nombre important de paramètres expérimentaux en mode Ramsey-CPT et SABR-CPT. La sensibilité à la puissance laser et la sensibilité à la puissance micro-onde ont été mesurées respectivement de $-2,9 \times 10^{-15} / \mu\text{W}$ et de $9,4 \times 10^{-14} / \%$, en bon accord avec les résultats rapportés dans [6]. En plus des paramètres " standards ", nous avons étudié récemment la sensibilité de la fréquence de l'horloge à la rotation ou à la translation d'éléments optiques clés ou de miroirs placés le long de l'installation optique de l'horloge. La stabilité de la polarisation du champ lumineux à l'entrée de la cellule et son impact sur la fréquence de l'horloge ont également été étudiés.

Nous présenterons à la conférence le résumé de ces mesures de sensibilité, et un état des lieux du budget de stabilité de l'horloge à 1 jour d'intégration. Nous discuterons du contrôle des paramètres à assurer pour viser ultimement des performances de stabilité d'horloge de l'ordre de 10^{-14} à 1 jour (1 ns de variation par jour).

Les auteurs remercient la DGA (Direction Générale de l'Armement) pour son soutien financier et ses discussions fructueuses.

Références :

- [1] B. Jaduszliwer and J. Camparo, Past, present and future of atomic clocks for GNSS, *GPS Solutions* 25, 27 (2021).
- [2] P. Yun, F. Tricot, C. E. Calosso, S. Micalizio, B. Francois, R. Boudot, S. Guérandel and E. de Clercq, High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation, *Phys. Rev. Applied* 7, 014018 (2017).
- [3] M. Abdel Hafiz, G. Coget, P. Yun, S. Guérandel, E. de Clercq and R. Boudot, A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock, *Journal of Applied Physics* 121, 104903 (2017).
- [4] P. Yun, Q. Li, Q. Hao, G. Liu, E. de Clercq, S. Guérandel, X. Liu, S. Gu, Y. Gao and S. Zhang, High-performance coherent population trapping atomic clock with direct-modulation distributed Bragg reflector laser, *Metrologia* 58, 05400 (2021).
- [5] S. Micalizio, C. E. Calosso, A. Godone and F. Levi, Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection, *Metrologia* 49, 425 (2012).
- [6] M. Abdel Hafiz, G. Coget, M. Petersen, C. Calosso, S. Guérandel, E. de Clercq and R. Boudot, Symmetric auto-balanced Ramsey interrogation for high-performance coherent-population-trapping vapor-cell atomic clock, *Applied Physics Letters* 112, 244102 (2018).
- [7] Y. Y. Jau, E. Miron, A. B. Post, N. N. Kuzma and W. Happer, Push-pull optical pumping of pure superposition states, *Phys. Rev. Lett.* 93, 16 (2004).
- [8] X. Liu, J. M. Mérola, S. Guérandel, C. Gorecki, E. de Clercq and R. Boudot, Coherent-population-trapping resonances in buffer-gas-filled Cs vapor cells with push-pull optical pumping, *Phys. Rev. A* 87, 013416 (2013).
- [9] B. Francois, C. E. Calosso, M. Abdel Hafiz, S. Micalizio and R. Boudot, Simple-design ultra-low phase noise microwave frequency synthesizers for high-performing Cs and Rb vapor cell atomic clocks, *Rev. Sci. Instr.* 86, 094707 (2015).
- [10] M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq and R. Boudot, Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser, *Optics Letters* 41, 13, 2982-2985 (2016).