

Stabilisations d'intensité et de fréquence laser implémentées sur un banc miniature d'horloge CPT

Jérémie Cotxet^{1,2}, François Guty¹, Ghaya Baili¹, David Holleville², Loïc Morvan¹, Stéphane Guérandel² et Daniel Dolfi¹

¹Thale Research & Technology 1 avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau, France

²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS-UMR 8630, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Pour répondre aux besoins grandissant de références de temps ultrastables, des études récentes ont permis le développement d'horloges atomiques sur cellules de hautes performances, présentant des stabilités relatives de fréquence de quelques 10^{-13} à 1 s et descendant jusqu'à quelques 10^{-15} à 10 000 s [1]. Ces horloges se basent sur le phénomène de piégeage cohérent de population (*Coherent Population Trapping* ou CPT) qui apparait quand les atomes sont illuminés par deux fréquences optiques dont l'écart correspond à la fréquence de la transition hyperfine (9.2 GHz dans le cas du césium). Afin de rendre la partie physique plus compacte tout en maintenant des performances de stabilité de laboratoire, nous avons développé, en collaboration avec la société française Kylia, un banc optoélectronique miniature (i.e. de volume inférieur à 10 L) tout collé qui permet les asservissements et la mise en forme du laser avant l'interrogation CPT du césium (figure 1).

Les fonctions implémentées sur le banc sont (i) l'isolation optique ; (ii) la stabilisation de l'intensité optique ; (iii) l'asservissement de la fréquence d'émission laser sur une transition optique du césium ; (iv) la détection du battement microonde et (v) la mise en forme des pulses pour l'interrogation Ramsey des atomes du résonateur. La conception du banc a été pensée pour permettre d'atteindre une stabilité de fréquence inférieure à 5×10^{-13} à 1 s et pour être compatible avec l'utilisation d'un faisceau laser bifréquence bipolarisation à 852 nm (transition D₂ du césium). Les caractérisations préliminaires présentées ci-dessous ont cependant été obtenues avec une source laser DFB commerciale monomode. L'étude complète de la stabilisation optique d'un laser émis par une cavité VECSEL bifréquence ont été présentés précédemment [2].

Pour l'asservissement de la fréquence optique émise un montage de spectroscopie par absorption saturée dans une cellule de césium blindée permet de générer un signal d'erreur par transfert de modulation [3]. Le signal correction issu d'un contrôleur PI est ensuite appliqué à l'entrée de modulation de l'alimentation en courant du laser. Les résultats de la réduction du bruit de fréquence du laser sont présentés en figure 2.a. Une forte réduction de 50 dB est observée aux basses fréquences de Fourier jusqu'à un plancher de 40 dBHz²/Hz. Au-delà de 500 Hz le bruit remonte et un excès de bruit de 6 dB apparait à 30 kHz avant de revenir au bruit du laser libre.

La stabilisation de l'intensité optique est réalisée en ajustant la transmission d'un modulateur acousto-optique pour maintenir la puissance détectée par une photodiode égale à une tension de référence [4]. Les résultats de la stabilisation sont présentés en figure 2.b. Dans la boucle d'asservissement, le bruit d'intensité relatif (RIN) du laser est fortement réduit jusqu'au niveau de la tension de référence utilisée et atteint un plancher de -158 dB/Hz entre 100 Hz et 10 kHz. Au-delà de la bande passante de l'électronique, un excès de bruit de 4 dB apparait à 200 kHz.

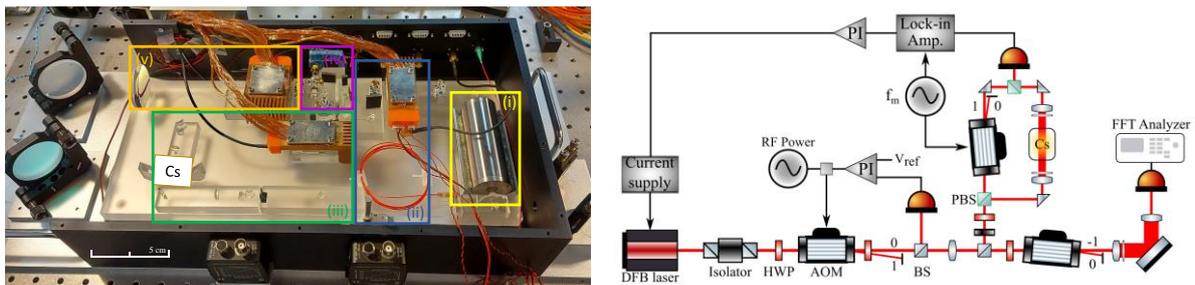


Figure 1 : Banc miniature et schéma d'asservissement et de mise en forme du laser pour l'interrogation atomique.

Hors de la boucle, juste avant le résonateur atomique, le RIN du laser est dégradé par rapport au signal mesuré dans la boucle. Sous 100 Hz, le passage par l'AOM de mise en forme des pulses (ici en fonctionnement continu) perturbe fortement le RIN de plusieurs dizaines de dB. L'asservissement de la fréquence étant en fonctionnement simultané, une bosse de bruit de 3 dB apparaît à la fréquence de coupure de l'électronique (30 kHz) où la stabilisation de puissance manque de gain pour la corriger. Au-delà de 200 kHz, le RIN revient au niveau du bruit du laser en fonctionnement libre.

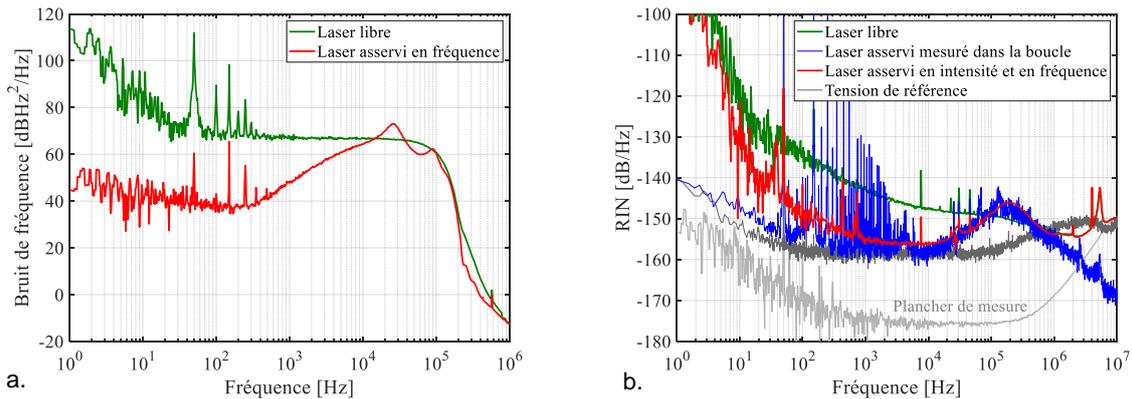


Figure 2 : a. Bruit de fréquence du laser quand l'émission est asservie sur une transition optique du césium.
 b. Bruit d'intensité relatif du laser en fonctionnement libre et quand les asservissements sont en marche.

Les contributions des bruits laser à la stabilité de fréquence relative de l'horloge sont estimées par le calcul des processus de transfert AM-FM et FM-FM (tableau 1). En considérant une séquence d'interrogation pulsée, ces effets sont particulièrement significatifs sur la plage de fréquence entre 50 Hz et 10 kHz. Quand le laser est asservi, les contributions calculées sont dix fois inférieures au niveau de stabilité d'horloge visé.

Bruits du laser	Ecart-type d'Allan à 1 s ($\times 10^{-13}$)
Bruit d'intensité	0.57
Bruit de fréquence	0.10

Tableau 1. Estimations des contributions des bruits du laser à la stabilité de fréquence relative de l'horloge.

Cette caractérisation complète du banc miniature valide la conception réalisée et est prometteuse pour la mise en place du système d'horloge complet. En particulier, les travaux sont en cours pour vérifier la qualité du signal CPT issu du résonateur avec deux sources DFB asservies en phase à par injection optique et ainsi obtenir une première mesure de stabilité de fréquence.

En parallèle de cette étude, le développement d'une cavité laser unique émettant directement deux modes de polarisation orthogonaux espacés en fréquence de 9.2 GHz [5] a récemment montré la faisabilité des asservissements simultanés des deux fréquences optiques émises. Une fois finalisés, ces deux axes permettront la mise en place d'une horloge aux dimensions inédites pour ces niveaux de performance.

Références :

[1] M. Abdel Hafiz *et al.*, "Toward a High-Stability Coherent Population Trapping Cs Vapor-Cell Atomic Clock Using Autobalanced Ramsey Spectroscopy", *Physical Review Applied* 9, 064002, 2018.
 [2] J. Cotxet *et al.*, "Développement d'un banc miniature de stabilisation de puissance optique pour horloge atomique compacte", conference paper, JCOM, 2021.
 [3] D. J. McCarron *et al.*, "Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium", *Meas. Sci. Technol.* 19 105601, 2008.
 [4] F. Tricot *et al.*, "Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator", *Review of Scientific Instruments*, 89 (11), 2018.
 [5] G. Gredat *et al.*, "Optimization of laser dynamics for active stabilization of DF-VECSELs dedicated to cesium CPT clocks", *J. Opt. Soc. Am. B* 37, 1196-1207, 2020.