

## Références de fréquence microonde et optique à microcellule Cs à FEMTO-ST

R. Boudot, A. Gusching, C. Carlé, R. Vicarini, N. Passilly, I. Ryger, M. Petersen, M. Abdel Hafiz  
 FEMTO-ST, CNRS, UBFC, ENSMM, 26 rue de l'épithaphe 25030 Besançon cedex.

Le laboratoire FEMTO-ST travaille depuis 15 ans sur le développement d'horloges atomiques miniatures. Ces « micro-horloges » atomiques reposent sur l'interaction d'atomes de césium confinés dans une cellule micro-fabriquée avec un signal microonde à 9.192 GHz porté optiquement, généré par modulation directe du courant d'injection d'une diode laser de type VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser). Cette interaction permet, à résonance, de porter les atomes dans un état quantique particulier, nommé « piégeage cohérent de population » (CPT : coherent population trapping) [1], dans lequel l'absorption des photons par les atomes est réduite. Ainsi, on détecte en transmission, en sortie de cellule à l'aide d'une simple photodiode, un signal de résonance mis à profit par le biais d'une électronique de contrôle pour asservir la fréquence d'un oscillateur local (modulant la VCSEL) sur la fréquence de transition des atomes.

La microcellule, montrée figure 1(a), consiste en deux cavités, connectées par d'étroits canaux, gravées dans un substrat de silicium de part et d'autre duquel sont soudés anodiquement deux substrats de verre [2]. L'originalité majeure de cette technologie de microcellule consiste à générer la vapeur alcaline au sein de la cellule après son scellement final par activation laser d'une pastille-dispenser préalablement disposée au sein de la cellule lors de sa fabrication. Cette approche de remplissage est simple, efficace et aujourd'hui répliquée dans de nombreux groupes. Cette microcellule est ensuite intégrée au sein d'un module physique (figure 1b) [3], de dimensions de l'ordre du  $\text{cm}^3$ , au sein duquel elle est associée à la diode laser VCSEL et différents composants optiques pour la mise en forme et détection du faisceau. Ce module physique est ultimement embarqué sur une carte électronique de contrôle, constituant l'horloge complète (figure 1(c)).

Depuis 2014, nos efforts de valorisation poussés, soutenus par la DGA, ont conduit aux premières micro-horloges atomiques industrielles françaises, conjointement développées par Tronics Microsystems (technologie de microcellule [4] et module physique) et Syrlinks (électronique et horloge). Ces horloges industrielles viseront ultimement un volume de  $15 \text{ cm}^3$ , une consommation de 120 mW et une dérive de 1 microseconde/jour, 100 fois inférieure à celle des oscillateurs à quartz encore massivement utilisés, les rendant très attractives pour la synchronisation de réseaux, les systèmes de navigation par satellite ou la sécurisation des communications. Pour illustration, la figure 1(d) montre la déviation d'Allan d'une horloge atomique à microcellule développée au laboratoire, en comparaison aux performances typiques d'un oscillateur à quartz de type OCXO. La stabilité relative de fréquence de l'horloge est de  $8 \cdot 10^{-11}$  à 1 s et  $6 \cdot 10^{-12}$  à 1 jour d'intégration.

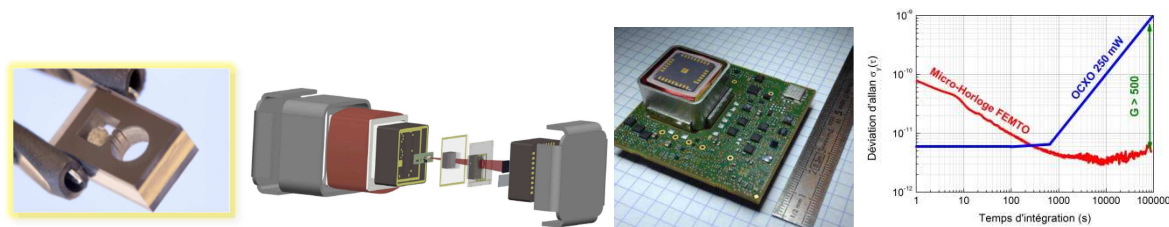


Figure 1. De gauche à droite : (a) Photographie d'une microcellule à vapeur de césium, cœur de l'horloge. (b) Module physique intégré associant diode laser VCSEL, optique, microcellule, photodiode, éléments de chauffe, champ magnétique, blindage magnétique. Extrait de [3]. (c) Photographie d'un prototype d'horloge embarquant un module physique sur son électronique de contrôle (Tronics, Syrlinks, FEMTO-ST). (d) Performances de stabilité (déviations d'Allan) obtenues pour une horloge à microcellule de laboratoire à FEMTO-ST.



JCOM 2021  
ESYCOM–Le Cnam  
Paris  
04 juin 2021



Malgré des performances remarquables, les micro-horloges atomiques actuelles présentent des limitations: une fréquence de transition microonde « trop » faible de « seulement » 10 GHz environ, un laser trop bruyant en fréquence limitant la stabilité de fréquence court terme de l'horloge et la présence de gaz tampons ou parasites dans la cellule limitant leur stabilité long terme.

En réponse, nous avons entrepris à FEMTO-ST le développement d'horloges atomiques à microcellule de « nouvelle génération », optiques cette fois-ci, visant des performances de stabilité accrues par au moins deux ordres de grandeur. Dans ce domaine, le NIST a démontré des résultats convaincants avec la démonstration de l'intégration photonique d'une horloge optique à microcellule exploitant une transition à 2 photons de l'atome de Rb à 778 nm avec une stabilité relative de fréquence de  $4 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  jusque 1000 s [5] (avec  $\tau$  le temps d'intégration), récemment améliorée à  $2.9 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  par le biais d'un breadboard optique compact de 35 cm<sup>3</sup> seulement [6].

A FEMTO-ST, notre première référence optique à microcellule consiste à stabiliser la fréquence d'un laser à 895 nm (raie D<sub>1</sub> du césium) sur une microcellule Cs pure, sans gaz tampon et fonctionnalisée par une technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence contre-propageants et mutuellement polarisés orthogonalement. Cette dernière consiste à faire interagir, à champ magnétique quasi-nul, des atomes de césium en agitation thermique au sein d'une cellule avec deux champs optiques bi-fréquence contre-propageants et mutuellement polarisés orthogonalement. Cette approche, analogue bi-fréquence de la technique bien connue d'absorption saturée, permet la détection de résonances optiques à fort contraste et affranchies d'élargissement Doppler.

Deux lasers stabilisés sur microcellule ont été mis en place « sur table ». Chaque setup est composé d'une diode laser, un modulateur électro-optique fibré de type Mach-Zehnder (pour produire le champ optique bi-fréquence) piloté à 4.596 GHz, un modulateur acousto-optique pour stabilisation de la puissance laser. Le faisceau de sortie est transmis dans une microcellule Cs, disposée au sein d'un module physique contrôlé en température et champ magnétique, et réfléchi en sortie à l'aide d'un miroir. La lumière est alors détectée à l'entrée de la cellule par le biais d'un cube polarisant.

La stabilité de fréquence court terme préliminaire du battement entre deux systèmes lasers quasi-identiques est de  $1.5 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  jusque 100 s et actuellement limitée par le phénomène d'intermodulation lié au bruit de fréquence intrinsèque d'un des deux lasers de type DFB (Distributed Feedback). Ces performances court terme sont très encourageantes car près de 100 fois supérieures à celles de micro-horloges atomiques commerciales et compétitives avec les performances démontrées dans [5,6].

#### Références:

- [1] J. Vanier, "Atomic clocks based on coherent population trapping: a review", Appl. Phys. B, Lasers Opt. 81, 4, 421-442 (2005).
- [2] M. Hasegawa et al., "Microfabrication of cesium vapour cells with buffer gas for MEMS atomic clocks", Sensors Actuators 167, 594-601 (2011).
- [3] R. Vicarini et al., "Mitigation of temperature-induced light-shift effects in miniaturized atomic clocks", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 66, 12, 1962 (2019).
- [4] R. Vicarini et al., "Demonstration of the mass-producible feature of a Cs vapour microcell technology for miniature atomic clocks", Sensors Actuators: Phys. A. 280, 99-106 (2018).
- [5] Z. Newman et al., "Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock", Optica 6, 5, 680 (2019).
- [6] V. Maurice et al., "Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks", Optics Express 28, 17, 24708 (2020).
- [7] M. Abdel Hafiz et al., « Doppler-free spectroscopy on the Cs D<sub>1</sub> line with a dual-frequency laser », Optics Letters 41, 2982 (2016).
- [8] D. V. Brazhnikov et al., « Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: Extended theoretical model and microcell-based experiments », Phys. Rev. A 99, 062508 (2019).