

# Horloges atomiques microondes et optiques à microcellule

Clément Carlé<sup>1</sup>, Anthony Gusching<sup>1</sup>, Moustafa Abdel Hafiz<sup>1</sup>, Shervin Keshavarzi<sup>1</sup>, Ivan Ryger<sup>1</sup>, Vincent Maurice<sup>2</sup>, Nicolas Passilly<sup>1</sup>, Rodolphe Boudot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FEMTO-ST, CNRS, Université Bourgogne Franche Comté, ENMM, 25000 Besançon, France

<sup>2</sup> IEMN, Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytech. Hauts de France, Lille, France

[rodolphe.boudot@femto-st.fr](mailto:rodolphe.boudot@femto-st.fr)

Nous présentons en premier lieu des travaux visant au développement d'horloges atomiques microondes à microcellule de haute stabilité, basées sur le phénomène de piégeage cohérent de population (CPT). Nous démontrons l'implémentation de séquences d'interrogation impulsionnelles avancées permettant une réduction drastique des effets de déplacement lumineux, combinés à la poursuite d'efforts technologiques pour l'aboutissement d'une technologie de microcellule avancée. En second lieu, nous démontrons des références de fréquence optiques, lasers stabilisés sur microcellule par spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence, présentant une stabilité relative de fréquence court terme de  $1.5 \cdot 10^{-12}$  à 1 s, 100 fois supérieure à celle des micro-horloges atomiques commerciales actuelles.

**MOTS-CLEFS :** *horloges atomiques, microcellule, spectroscopie, stabilité de fréquence*

L'interrogation par voie optique d'une vapeur d'atomes alcalins au sein d'une cellule micro-fabriquée a permis le développement d'une large variété d'horloges et capteurs atomiques intégrés de haute performance [1]. Dans ce domaine, les horloges atomiques microondes basées sur le phénomène de piégeage cohérent de population (CPT) ont connu, en raison d'un budget volume-consommation-stabilité sans égal, un large succès, incluant leur commercialisation [2][3] et leur déploiement dans une multitude d'applications telles que les systèmes de navigation ou la sécurisation des communications numériques.

Avec une stabilité relative de fréquence journalière de l'ordre de  $10^{-11}$  (soit 1  $\mu$ s par jour), les performances long-terme de ces micro-horloges demeurent cependant limitées par deux contributions majeures que sont les déplacements lumineux et une possible lente évolution de l'atmosphère interne de la microcellule.

Partants de ce constat, nos travaux récents se sont portés sur deux axes de recherche complémentaires. Le premier axe d'étude a porté sur l'implémentation et la démonstration de protocoles d'interrogation impulsionnels avancés, inspirés de la spectroscopie Ramsey [4], permettant une extraction et compensation du déplacement lumineux de fréquence subi par les atomes lors des impulsions optiques. Ces techniques permettent une réduction de la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations de puissance laser, puissance microonde ou fréquence laser, allant jusque deux ordres de grandeur, par comparaison avec la méthode d'interrogation continue conventionnelle [5][6]. Ces travaux se combinent avec des efforts technologiques significatifs visant au développement d'une technologie de microcellule améliorée. Ces travaux devraient poser les fondements d'horloges atomiques miniatures CPT avec une stabilité de fréquence long-terme améliorée.

En dépit de ces améliorations, ces micro-horloges atomiques « microondes » souffrent cependant de contributions inhérentes limitant leurs performances ultimes : une fréquence d'horloge de « seulement » 10 GHz, un laser (VCSEL) au bruit de fréquence trop

important ainsi que la présence de gaz tampon ou parasites dans la cellule pouvant dégrader leur stabilité long-terme.

En réponse, l'exploitation de techniques de spectroscopie sub-Doppler au sein de microcellules alcalines, évitant le recours aux techniques complexes de refroidissement d'atomes par laser et donc à l'ultravide, constitue une approche stimulante vers le développement de références de fréquence atomiques optiques de nouvelle génération hautement intégrées et de haute stabilité.

Dans ce domaine, nous avons récemment initié le développement de lasers stabilisés sur microcellule Cs par le biais d'une technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence [7]. Cette interaction, à condition de désaccord Raman nul et de faisceaux contre-propageants mutuellement polarisés orthogonalement, conduit à la création d'états noirs interférant destructivement, menant à une augmentation de l'absorption de la vapeur atomique et la détection de résonances optiques à fort contraste, dont la largeur ultime est imposée par la largeur naturelle de la transition ( $\sim 5$  MHz).

Par cette approche, nous avons démontré un battement entre deux lasers (une diode laser DFB et un laser à cavité étendue) avec une stabilité relative de fréquence de  $1.5 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  jusque 100 s ( $\tau$ , temps d'intégration de la mesure), actuellement limitées par le bruit de fréquence intrinsèque de la diode DFB [8]. Ces performances court terme sont 100 fois meilleures à celles des micro-horloges atomiques commerciales actuelles et comparables à celles obtenues via l'exploitation de la transition à 2-photons à 778 nm de l'atome de Rb [9]. Ces résultats sont encourageants et suggèrent l'intérêt de cette approche pour le développement futur d'horloges atomiques optiques ultra-compactes par l'association de tels lasers stabilisés à des peignes de fréquence à micro-résonateurs optiques.

## REFERENCES

---

<sup>1</sup>J. Kitching, "Chip-scale atomic devices," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 5, 031302, 2018.

<sup>2</sup><https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>.

<sup>3</sup><https://www.syrlinks.com/fr/produits/all/temps-frequence/horloge-atomique-miniature-mmac>.

<sup>4</sup>N. F. Ramsey, "A molecular beam resonance method with separated oscillating fields," *Phys. Rev.*, vol. 78, 6, 695, 1950.

<sup>5</sup>M. Abdel Hafiz et al., "Light-shift mitigation in a microcell atomic clock with symmetric auto-balanced Ramsey spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 120, 064101, 2022.

<sup>6</sup>M. Abdel Hafiz et al., "Protocol for light-shift compensation in a continuous-wave microcell atomic clock," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, 034015, 2020.

<sup>7</sup>D. Brazhnikov et al., "Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: extended theoretical model and microcell-based experiments," *Phys. Rev. A*, vol. 99, 062508, 2019.

<sup>8</sup>A. Gusching et al., "Short-term stability of Cs microcell-stabilized lasers using dual-frequency sub-Doppler spectroscopy," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 38, 10, pp 3254-3260, 2021.

<sup>9</sup>V. Maurice et al., "Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable atomic clocks," *Opt. Exp.*, vol. 28, pp 24708-24720, 2020.