

## **Offre de Post-doctorat**

### **Institut FEMTO-ST**

Département Temps-Fréquence  
26 rue de l'épître 25030 Besançon, France

**Sujet : Explorer l'utilisation de protocoles d'interrogation impulsions  
au sein d'horloges atomiques CPT miniatures**

**Durée : 12 mois (extension envisageable)**

Au cours de la dernière décennie, la combinaison d'un phénomène physique nommé piégeage cohérent de population (CPT), le progrès des technologies MEMS et des lasers à semi-conducteurs, a permis le développement d'horloges atomiques miniatures [1-4]. Ces dernières, devenues aujourd'hui commerciales [5], sont très attractives pour une multitude d'applications industrielles et stratégiques par leur aptitude à combiner un volume total de l'ordre de  $15 \text{ cm}^3$ , une puissance de consommation de 150 mW et une stabilité relative de fréquence de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-11}$  à 1 s et  $1-2 \cdot 10^{-11}$  à 1 journée d'intégration.

Malgré des performances déjà remarquables, une limitation majeure aux performances de stabilité de fréquence des horloges atomiques CPT sur des temps d'intégration supérieurs à 100-1000s provient des phénomènes de déplacements lumineux. Ces derniers traduisent la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations de puissance laser, de fréquence laser ou d'asymétrie d'amplitude entre les deux raies résonantes CPT. Différentes méthodes ont été rapportées dans la littérature pour réduire ces effets [6-15]. Cependant, l'efficacité de ces méthodes demeure limitée et les déplacements lumineux restent une contribution majeure à l'instabilité moyen et long-terme des micro-horloges atomiques.

Une approche possible pour réduire les effets de déplacement lumineux au sein d'horloges atomiques est le recours à une technique d'interrogation impulsionnelle de type Ramsey [16]. Dans une horloge Ramsey-CPT, les atomes interagissent avec une séquence d'impulsions lumineuses CPT où chaque impulsion, séparée par un temps d'évolution libre des atomes dans le noir, est utile pour le pompage CPT et la détection du signal d'horloge.

Cependant, la spectroscopie Ramsey conserve une sensibilité résiduelle non-négligeable aux déplacements de fréquence induits par le champ d'interrogation lors des impulsions lumineuses [17]. Au cours de la dernière décennie, d'impressionnants efforts théoriques ont été poursuivis par plusieurs groupes [18] afin de proposer des protocoles d'interrogation impulsions composites robustes visant à éliminer les déplacements de fréquence induits lors de l'interaction des atomes avec le champ d'interrogation. Parmi ces derniers, le protocole d'interrogation nommé Auto-Balanced Ramsey (ABR), initialement proposé par la PTB en 2018 [19] puis généralisé dans [20], a conduit à des résultats remarquables et a suscité un intérêt marqué de la communauté temps-fréquence.

A FEMTO-ST, nous avons récemment démontré l'application de la méthode Auto-Balanced Ramsey sur une horloge CPT compacte à cellule de Cs (cellule classique, non MEMS) de haute-performance [21]. Nous avons proposé une séquence d'interrogation ABR optimisée dite symétrique (SABR-CPT) [22]. Le résultat majeur de cette technique SABR-CPT fut une réduction drastique de la dépendance

relative de la fréquence d'horloge à la puissance laser (80 fois inférieure au régime Ramsey-CPT, 800 fois inférieure au régime continu), réduisant fortement cette contribution sur la stabilité de fréquence d'horloge à  $10^4$  s. Récemment, des variantes de cette méthode ABR, permettant de simplifier l'implémentation expérimentale de ces méthodes, ont été démontrées [23,24].

A ce jour et à notre connaissance, aucune micro-horloge atomique CPT au monde n'exploite une méthode d'interrogation impulsionnelle de type Ramsey. En effet, en raison du temps de relaxation limité de la cohérence CPT en microcellule, la méthode Ramsey-CPT appliquée en microcellule ne laisse pas entrevoir d'amélioration majeure de la stabilité de fréquence court-terme. Par contre, l'implémentation de protocoles d'interrogation impulsionnels type Ramsey-CPT puis ABR-CPT en microcellule pourrait laisser entrevoir la possibilité de réduire de manière significative la contribution des effets de déplacement lumineux en micro-horloge CPT et donc possiblement permettre l'amélioration de la stabilité de fréquence moyen-long terme de ces dernières.

Dans le cadre du projet SUPREM financé par le LabeX FIRST-TF (<http://first-tf.fr>), le (la) candidate cherchera à explorer et étudier la possibilité et démontrer l'efficacité de l'implémentation de protocoles d'interrogation impulsionnels dans une horloge CPT à microcellule. Le (la) candidate pourra pour ses travaux s'appuyer sur un banc-horloge CPT prototype déjà disponible au laboratoire, basé sur l'exploitation d'une diode laser VCSEL modulée et d'une microcellule à vapeur de césium. Les premiers tests seront réalisés en mode Ramsey-CPT, visant à démontrer la détection de franges Ramsey-CPT en microcellule et évaluer le potentiel de cette méthode (stabilité de fréquence court-terme et étude de la sensibilité aux déplacements lumineux). Dans un second temps, l'implémentation de protocoles d'interrogation impulsionnels composites type ABR-CPT sera envisagée. Ce type de protocole repose sur l'utilisation de deux séquences Ramsey-CPT consécutives avec des temps noirs (T) de durée différente, desquelles deux signaux d'erreur sont extraits. Le premier signal d'erreur, issu du cycle court, permet de compenser le déplacement lumineux induit lors de l'interaction des atomes avec l'impulsion lumineuse. Le second cycle, issu du cycle long, permet d'asservir la fréquence de l'oscillateur local sur la résonance atomique. L'extraction et l'exploitation du signal d'erreur utile à la compensation du déplacement lumineux peut s'implémenter de différentes manières : soit par l'application d'une correction de phase de l'oscillateur local durant le temps noir [19,22], soit en sondant la frange centrale par des sauts de fréquence asymétriques (plus grand saut à droite qu'à gauche de la frange ou inversement) [23], soit par la génération d'un signal d'erreur résultant de la différence normalisée des deux signaux d'erreur consécutifs [24]. Le (la) candidat(e) contribuera à évaluer de manière préliminaire les performances de cette horloge dans différents modes de fonctionnements, avec une attention particulière concernant l'étude des déplacements lumineux de fréquence et l'impact sur la stabilité de fréquence de l'horloge pour des temps d'intégration supérieurs à 100 s.

Le (la) candidat(e) intégrera le groupe OHMS (<http://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/>) au sein du département Temps-Fréquence de FEMTO-ST ([www.femto-st.fr](http://www.femto-st.fr)). Ce groupe possède à ce jour plus de 10 ans d'expérience sur le développement de micro-horloges atomiques CPT et est un acteur majeur de ce domaine au niveau international [4].

Le (la) candidat(e) doit avoir une expérience forte dans le cadre d'une thèse de doctorat dans les domaines de la physique appliquée, physique atomique ou sciences pour l'ingénieur. Le (la) candidate doit présenter des compétences fortes en instrumentation et programmation pour le pilotage d'expérience (langage Python fortement souhaité), électronique analogique et numérique. Son rôle premier sera d'implémenter la programmation des séquences Ramsey-CPT et ABR-CPT pour le fonctionnement de l'horloge dans ces modes d'opération. Le (la) candidat(e) doit avoir des compétences en optique, lasers et spectroscopie. Une fois les séquences fixées, le (la) candidat(e) mènera une étude métrologique rigoureuse des performances de stabilité de l'horloge dans différents modes d'opération. Une expérience (stage/thèse/etc.) avec l'utilisation de circuits FPGA est un point fort qui pourrait être mis à profit en cours de projet.

Le (la) candidat(e) évoluera au sein d'une équipe composée de chercheurs, ingénieurs et techniciens, disposera du soutien des services électronique, mécanique et informatique de l'Institut FEMTO-ST et d'une infrastructure de choix dédiée à la métrologie temps-fréquence (<http://oscillator-imp.com/dokuwiki/doku.php>). Le (la) candidat(e) sera amené(e) à présenter ses travaux dans des conférences internationales et visera à la publication de ses travaux dans des revues internationales à comité de lecture.

### **Conditions du contrat et comment postuler ?**

**Diplôme requis** : Thèse de doctorat (physique/sciences pour l'ingénieur)

**Date de début du contrat** : dès septembre 2019.

**Salaire** : environ 2.2 k€ net par mois (sans « expérience » en sortie de thèse). Ajustement en fonction du nombre d'années d'expérience post-doctorat.

**Démarche** : transmettre CV, lettre de motivation et si disponible lettres de recommandations.

### **Contact :**

**Dr. Rodolphe Boudot**

FEMTO-ST

Département Temps-Fréquence / Site ENSMM

26, rue de l'épithaphe 25030 Besançon, France.

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

**Tel** : +33 (0)3 81 40 28 56

---

### **Bibliographie :**

- [1] S. Knappe et al., A microfabricated atomic clock, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 9, 1460 (2004).
- [2] R. Lutwak et al., The chip-scale atomic clock – Prototype evaluation, 39th Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, 269-290 (2007).
- [3] J. Kitching, Chip-scale atomic devices, *Appl. Phys. Rev.* 5, 031302 (2018).
- [4] R. Vicarini, V. Maurice, M. Abdel Hafiz, J. Rutkowski, C. Gorecki, N. Passilly, L. Ribetto, V. Gaff; V. Volant, S. Galliou and R. Boudot, *Sensors Actuators A* 280, 99-106 (2018).
- [5] <https://www.microsemi.com/product-directory/cesium-frequency-references/4115-5071a-cesium-primary-frequency-standard>
- [6] M. Zhu, L. S. Cutler, *Proceedings of the 32nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, 311 (2000).
- [7] V. Shah et al., *Appl. Phys. Lett.* 89, 151124 (2006).
- [8] S. Knappe et al., Long-term stability of NIST chip-scale atomic clock physics packages, *Proceedings 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting*, 241-250 (2008).
- [9] B. H. McGuyer et al., *Appl. Phys. Lett.* 94, 251110 (2009).
- [10] D. Miletic et al., *Appl. Phys. B* 109, 89-97 (2012).
- [11] Y. Zhang et al., *J. Opt. Soc. Am. B* 33, 1756 (2016).
- [12] R. Lutwak et al., 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, 1327 (2007).
- [13] J. Deng, J. D. Crockett, and T. C. English, Light stabilization for an optically excitable atomic medium, US patent 6 927 636 B2 (2005).
- [14] R. Vicarini et al., to be submitted to *Appl. Phys. Lett.* (2019).
- [15] N. Ramsey, *Phys. Rev.* 78, 695 (1950).
- [16] N. Castagna et al., *IEEE Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 56, 2, 246 (2009).
- [17] T. Zanon-Willette et al., *Report on Progress on Physics* 81, 094401 (2018).
- [18] C. Sanner et al., *Phys. Rev. Lett.* 120, 053602 (2018).
- [19] V. I. Yudin et al., *Phys. Rev. Applied* 9, 054034 (2018).
- [20] M. Abdel Hafiz et al., *J. Appl. Phys.* 121, 104903 (2017).
- [21] M. Abdel Hafiz et al., *Phys. Rev. Applied* 9, 064002 (2018).
- [22] M. Abdel Hafiz et al., *Appl. Phys. Lett.* 112, 244102 (2018).
- [23] M. Shuker et al., *Phys. Rev. Lett.* 122, 113601 (2019).
- [24] M. Shuker et al., *ArXiv* 1903:00566 (2019).
- [25] R. Boudot et al., *J. Opt. Soc. Am. B* 35, 5, 1004 (2018).