

**Titre de la thèse : Référence de fréquence optique à microcellule de vapeur alcaline de haute stabilité**

**Laboratoire d'accueil : FEMTO-ST (Besançon, France)**

**Spécialité du doctorat préparé : Sciences pour l'Ingénieur**

**Mots-clés : Horloges atomiques optiques miniatures, microcellule alcaline, métrologie temps-fréquence**

**Descriptif détaillé de la thèse :**

L'interrogation d'un ensemble d'atomes en phase vapeur au sein d'une cellule de dimensions millimétriques a permis au cours de la dernière décennie la démonstration et le développement d'une grande variété d'instruments quantiques miniatures de haute sensibilité et de grande précision [1], incluant en particulier des références de fréquence ultra-stables faible consommation dites micro-horloges atomiques [2]. Ces horloges atomiques microondes miniatures, devenues aujourd'hui commerciales [3,4], 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  $10^{-11}$  à 1 journée d'intégration.

Malgré des performances remarquables, ces horloges atomiques microondes présentent des défauts ou limites:

- (a) la fréquence de transition d'horloge appartient à la gamme microonde.
- (b) le bruit de fréquence des lasers VCSELs (largeur spectrale  $\sim 50 \text{ MHz}$ ) limite la stabilité de fréquence court terme de ces horloges.
- (c) la vapeur alcaline dans la cellule est diluée par une pression de gaz tampon induisant un déplacement de fréquence pouvant limiter la stabilité de fréquence long terme de l'horloge et interdisant l'établissement d'un budget d'exactitude pour cette dernière.

En réponse, nous avons initié à FEMTO-ST une activité visant au développement de références de fréquence à microcellule de « nouvelle génération », optiques cette fois-ci, bénéficiant de 5 ordres de grandeur sur la fréquence de transition atomique sondée. Ces références de fréquence optiques, combinant une microcellule à vapeur alcaline (Cs ou Rb), sans gaz tampon, et un laser à haute pureté spectrale, viseront à terme des performances de stabilité journalières 100 fois supérieures à celles des micro-horloges atomiques actuelles, tout en conservant une architecture compatible avec une miniaturisation poussée et une faible consommation.

Soutenue par un projet CNES, notre première référence de fréquence optique consiste à stabiliser la fréquence d'un laser à 895 nm à haute pureté spectrale sur une cellule à césium micro-fabriquée [5] par la technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence [6,7]. Un dispositif expérimental sur table a été mis en place permettant la comparaison de deux références de ce type, indiquant des résultats de stabilité de fréquence encourageants de l'ordre de  $1.5 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  jusque  $\tau = 10 \text{ s}$  [7]. Ces performances de stabilité court-terme sont encourageantes puisque 100 fois supérieures à celles des micro-horloges atomiques commerciales actuelles. Cependant, de nombreux travaux restent à mener pour pousser ce type de référence à ses performances ultimes. Le travail de cette thèse s'inscrit dans ce cadre et se concentrera sur trois axes majeurs de recherche.

Le premier axe de recherche visera à contribuer au développement d'une technologie de microcellule alcaline avancée, « habillée », fonctionnalisée, propice à être exploitée dans ce type de référence. En particulier, cette microcellule devra présenter :

- une atmosphère interne de haute pureté, dénuée de gaz résiduels et contaminants, dont la présence peut induire un élargissement de la résonance atomique optique. Dans ce cadre, le (la) candidat(e) évaluera l'exploitation de getters non-évaporables passifs (NEGs) [8,9] au sein de la cellule afin de pomper les impuretés générées par le processus de soudure anodique lui-même ou l'activation du dispenser. Des technologies alternatives seront aussi explorées pour disposer de sources alcalines propres, efficaces et aisément manipulables [10]. Le candidat envisagera aussi l'implémentation de

solutions permettant de réduire les phénomènes de perméation de gaz à travers les fenêtres de la cellule tels que l'exploitation de substrats de verres spécifiques [11] ou d'autres approches de ce type [12].

- un adressage et une transmission optique optimale. Dans ce cadre, le (la) candidat(e) proposera des solutions pour limiter les phénomènes de réflexions parasites au sein de la cellule pouvant induire des effets étalons perturbant la stabilité de fréquence du laser [13]. Aussi, des approches technologiques et/ou scientifiques originales seront proposées pour réduire les phénomènes de condensation d'alcalin sur les fenêtres de la cellule pouvant induire des fluctuations de puissance laser au cours du temps [14].

Le second axe de recherche, complémentaire au premier, concernera l'étude métrologique des performances en stabilité de fréquence du laser à microcellule Cs et visera simultanément à simplifier autant que possible l'architecture de la référence optique Cs. Dans ce cadre, le (la) candidat(e) travaillera sur :

- l'optimisation de la stabilité de fréquence court-terme par l'exploitation de lasers à haute pureté spectrale et large bande d'asservissement.
- l'étude des déplacements de fréquence majeurs limitant la stabilité de fréquence moyen-long terme.
- la possibilité d'exploiter une diode laser directement modulée pour éviter le recours à un modulateur électro-optique externe [15].

Le troisième axe de recherche, dont l'implication sera fonction et bénéficiera de l'avancement et des résultats obtenus sur les deux premiers axes de recherche, concernera l'investigation préliminaire d'un nouveau type de référence optique à microcellule reposant sur la stabilisation directe en fréquence d'une diode laser proche-UV à faible largeur spectrale sur la transition  $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$  à 459 nm de l'atome de césium [16].

### Références bibliographiques :

- [1] J. Kitching, *Appl. Phys. Rev.* **5**, 031302 (2018)
- [2] S. Knappe, MEMS atomic clocks, *Comprehensive microsystems*, **3**, 571-612 (2007).
- [3] <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>
- [4] <http://www.accubeat.com/product-item/nano-atomic-clock-nac1/>
- [5] M. Hasegawa et al., *Sensors Actuators: Phys. A* **167**, 594-601 (2011).
- [6] M. Abdel Hafiz et al., *Opt. Lett.* **41**, 2982 (2016).
- [7] D. Brazhnikov et al., *Phys. Rev. A* **99**, 062508 (2019).
- [8] R. Boudot et al., *Sci. Rep.* **10**, 16590 (2020)
- [9] B. J. Little, ArXiv 2101.01051 (2021), <https://arxiv.org/abs/2101.01051>
- [10] R. N. Kohn et al., *Rev. Sci. Instr.* **91**, 035108 (2020).
- [11] A. Dellis et al., *Opt. Lett.* **41**, 12, 2775 (2016).
- [12] S. Woetzel et al., *Surf. Coat. Technol.* **221**, 158-162 (2013).
- [13] V. Maurice et al., *Opt. Exp.* **28**, 17, 24708 (2020).
- [14] S. Karlen et al., Gold microdiscs as alkali preferential condensation spots for cell clock long-term frequency improvement, *European Frequency Time Forum, Proceedings* (2018).
- [15] P. Yun et al., ArXiv 2103.00707 (2021) <https://arxiv.org/abs/2103.00707>

**Profil demandé :** Le (la) candidate doit avoir pour diplôme un Master 2 ou équivalent ou un diplôme d'une Ecole d'Ingénieurs. Le (la) candidat(e) doit porter un intérêt majeur pour les disciplines de la physique appliquée en général. Une formation lui ayant permis d'acquérir des connaissances, voire un peu d'expérience (par des travaux pratiques par exemple) avec la salle blanche et les technologies MEMS est un réel atout. Des connaissances dans les domaines de la physique atomique, instrumentation-programmation, optique, électronique et conception mécanique sont des atouts. Il (elle) devra apprécier le travail en équipe.

### Financement

Source: Thèse Ministère

Deadline candidature : avant le 21 juin 2021

Début du contrat : octobre 2021 (au plus tard 01 décembre 2021)

Financement: environ 1.5 k€ net/mois

Possibilité de dispenser des TDs/TPs à l'Université ou ENSMM.

**Direction / codirection de la thèse** : Rodolphe Boudot et Nicolas Passilly

**Contacts:**

**Dr. Rodolphe Boudot**

FEMTO-ST

Département Temps-Fréquence / Site ENSMM

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

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

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

**Dr. Nicolas Passilly**

FEMTO-ST

Département MN2S

15B avenue des Montboucons

25000 Besançon

**Email** : [nicolas.passilly@femto-st.fr](mailto:nicolas.passilly@femto-st.fr)

**Tel:** 03.63.08.26.24



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

**PhD title : High-stability microcell-based optical frequency reference**

**Host laboratory : FEMTO-ST (Besançon, France)**

**Speciality of PhD: Engineering sciences / Applied physics / MEMS technologies**

**Keywords : Miniaturized optical clocks / MEMS alkali vapor cells / Time-frequency metrology**

**Job description :**

The interrogation of an alkali vapor atom ensemble in a mm-scale cell has allowed the development of a wide variety of high-precision chip-scale atomic devices [1], including in particular miniaturized atomic clocks [2]. These miniaturized microwave atomic clocks have known a remarkable development and progress, including their commercialization [3,4], and are attractive candidates for many applications due to their unrivaled size-power-frequency stability budget with a volume of  $15 \text{ cm}^3$ , a power consumption of 150 mW and a fractional frequency stability of about  $10^{-11}$  at 1 day integration.

Despite their remarkable performances, microwave CSACs suffer from some drawbacks and limitations.

- (a) the clock transition is in the microwave domain
- (b) the frequency noise of the VCSELs (spectral linewidth  $\sim 50 \text{ MHz}$ ) limits the clock short-term stability
- (c) the presence of buffer gas in the cell causes a temperature-dependence frequency shift of the clock transition that possibly limits the clock mid-term frequency stability and jeopardizes the establishment of a clock accuracy budget.

As a response, we have initiated at FEMTO-ST an activity for the development of « new-generation » optical microcell clocks, in which the probed clock transition frequency is enhanced by 5 orders of magnitude and then probed by a laser. These optical frequency references combine a buffer-gas free alkali vapor microfabricated cell and a high-spectral purity laser and will target ultimately fractional frequency stability performances 100 times better than current microwave chip-scale atomic clocks, while maintaining a simple architecture for integration and low power consumption.

Supported by a CNES project, our first optical frequency reference consists to stabilize the frequency of a 895 nm laser onto a microfabricated cell [5] using the dual-frequency sub-Doppler spectroscopy technique [6,7]. A table-top experimental setup was implemented, allowing the comparison between two microcell optical frequency references. Encouraging stability results of the laser beatnote at the level of  $1.5 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$  until  $\tau = 10 \text{ s}$  have already been demonstrated [7]. These short-term stability performances are encouraging since they are 100 times better than current commercial miniature clocks. However, significant efforts remain to be done to push these references to their best and optimized performances. The present PhD thesis subject offer enters in this frame and will focus onto three main research axes.

The first axis will aim to contribute to the development of an advanced and functionalized alkali microfabricated cell devoted to operate into this kind of frequency reference. In particular, this microcell should present:

- a high-purity internal atmosphere, free from excess residual gas, since these contaminants can induce a broadening of the detected optical atomic resonance. In this frame, the candidate will investigate the use of non-evaporable getters [8,9] in order to passively pump impurities generated from the anodic bonding process itself or induced by the pill dispenser activation. Alternative technologies will be explored to work with efficient, clean and easy-to-manipulate alkali sources [10]. The

candidate will also envision the implementation of solutions to reduce gas permeation issues through the cell glass windows, such as specific glass substrates [11] or alternative approaches [12].

- an optimal optical transmission and addressing. In this frame, the candidate will propose solutions to limit spurious light reflexions in to the cell that might induce etalon effect perturbing the laser frequency stability [13]. In addition, original scientific and/or technological approaches will be proposed to reduce alkali condensation phenomena onto the cell windows that might induce laser power fluctuations and then clock frequency fluctuations along time [14].

The second axis, complementary to the first one, will concern the metrological study and characterization of the microcell based optical frequency reference. Efforts will be produced to simplify as much as possible the clock architecture. In this domain, the candidate will work on:

- the optimization of the clock short-term stability performances through the use of narrow-linewidth and high-modulation bandwidth lasers.
- the study of main frequency shifts contributing to the clock mid-term stability.
- the possibility to use a directly-modulated low FM noise laser to avoid the use of an external electro-optic modulator [15].

The third research axis, whose involvement will depend on the project progress and would benefit from both first above-mentioned research paths, will concern the preliminary investigation of a new type of microcell-optical frequency reference based on the direct frequency stabilization of a near-UV laser at 459 nm onto the Cs atom  $6S_{1/2} - 7P_{1/2}$  transition [16].

#### References :

- [1] [J. Kitching, Appl. Phys. Rev. 5, 031302 \(2018\)](#)
- [2] S. Knappe, MEMS atomic clocks, Comprehensive microsystems, 3, 571-612 (2007).
- [3] <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>
- [4] <http://www.accubeat.com/product-item/nano-atomic-clock-nac1/>
- [5] M. Hasegawa et al., Sensors Actuators: Phys. A 167, 594-601 (2011).
- [6] M. Abdel Hafiz et al., Opt. Lett. 41, 2982 (2016).
- [7] D. Brazhnikov et al., Phys. Rev. A 99, 062508 (2019).
- [8] R. Boudot et al., Sci. Rep. 10, 16590 (2020)
- [9] B. J. Little, ArXiv 2101.01051 (2021), <https://arxiv.org/abs/2101.01051>
- [10] R. N. Kohn et al., Rev. Sci. Instr. 91, 035108 (2020).
- [11] A. Dellis et al., Opt. Lett. 41, 12, 2775 (2016).
- [12] S. Woetzel et al., Surf. Coat. Technol. 221, 158-162 (2013).
- [13] V. Maurice et al., Opt. Exp. 28, 17, 24708 (2020).
- [14] S. Karlen et al., Gold microdiscs as alkali preferential condensation spots for cell clock long-term frequency improvement, European Frequency Time Forum, Proceedings (2018).
- [15] P. Yun et al., ArXiv 2103.00707 (2021) <https://arxiv.org/abs/2103.00707>

#### Candidate Profile:

The candidate should have a Master 2 degree or diploma from an « Ecole d'Ingénieur ». He (she) should enjoy applied physics sciences. A background cursus with knowledge and even know-how (through lab works for example) with clean room facilities and MEMS technologies would be appreciated. Additional knowledge in atomic physics, optics, electronics and instrumentation is also a plus-value. He (She) should enjoy team working.

#### Financing Institution:

Application deadline : before 21 June 2021  
Start of contract : october 2021 (max. 01 Décembre 2021)  
Funding: about 1.5 k€/month  
Possibility to perform in addition courses/lab works in University or ENSMM.

**Supervisor(s) :** Rodolphe Boudot et Nicolas Passilly

**Contacts:**

**Dr. Rodolphe Boudot**

FEMTO-ST

Département Temps-Fréquence / Site ENSMM

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

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

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

**Dr. Nicolas Passilly**

FEMTO-ST

Département MN2S

15B avenue des Montboucons

25000 Besançon

**Email :** [nicolas.passilly@femto-st.fr](mailto:nicolas.passilly@femto-st.fr)

**Tel:** 03.63.08.26.24