

Horloge atomique CPT ultra compacte à capteur de césium de haute performance

CPT compact atomic clock with high performance Cs sensor

Porteur(s) : R. Boudot (FEMTO-ST)

Partenaire(s) : S. Guérandel, E. Declercq (SYRTE)

Résumé du projet en Français :

Les performances de nombreux systèmes sont directement améliorées par la stabilité de fréquence de la référence de temps ou horloge qu'ils embarquent. Dans certains domaines de pointe, les besoins typiquement exprimés sont une stabilité de fréquence de quelques 10^{-13} sur un temps d'intégration de 1 s et atteignant quelques 10^{-15} à 1 journée d'intégration. À ce jour, ces performances peuvent être obtenues par des oscillateurs saphir cryogéniques (CSO) (jusqu'à 1 jour d'intégration), bien meilleurs sur le court terme, ou par des masers à hydrogène (Maser H), dispositifs encombrants et très énergivores. Récemment, des performances proches au Maser H ont été démontrées à l'aide d'horloges atomiques compactes à cellule de vapeur alcaline sans recours aux atomes froids. Ces dernières consomment beaucoup moins d'énergie et sont bien plus compactes, les rendant attractives.

Les horloges compactes, de grande stabilité à court terme, sont nécessaires pour les systèmes de télécommunications, la navigation, les systèmes GNSS mais aussi le spatial et la défense. Ces applications sont de plus en plus demandeuses en hautes performances. Citons deux exemples : ASD-EUROSPACE dans son document *R&T Priorities* de 2012 recommande une amélioration de la précision des horloges et de leur rapport masse/puissance pour la prochaine génération de système GNSS européen. Le document de la DGA *Politique et Objectifs Scientifiques* mentionne explicitement dès 2006 l'utilisation d'horloges à vapeur d'alcalins et piégeage cohérent de population (CPT) pour les systèmes de radionavigation ou la synchronisation de systèmes d'information et de commandement.

Dans le domaine des « horloges atomiques à cellule », les horloges basées sur le phénomène de piégeage cohérent de population (CPT) sont une alternative très prometteuse pour combiner des performances en stabilité et une très forte compacité. Cette solution technologique est une brique essentielle du projet JRP SRT-i24 de l'EURAMET (Compact and high-performing microwave clocks for industrial applications) déposé par les laboratoires experts européens du domaine. Dans ce cadre, les laboratoires LNE-SYRTE et FEMTO-ST ont proposé conjointement le développement d'une horloge atomique CPT compacte.

Actuellement, la meilleure horloge CPT au monde, développée au LNE-SYRTE, présente une stabilité relative de fréquence de $3,2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ et de $3,5 \cdot 10^{-14}$ à 1 heure. Cette horloge combine un schéma d'interaction dit *lin per lin* et une interrogation Ramsey temporelle réalisée par le biais d'un modulateur acousto-optique obturant la lumière. La stabilité de l'horloge est limitée essentiellement par le bruit de puissance des lasers et par le bruit de l'oscillateur local. La stabilité limite estimée pour le bruit de grenaille de cette horloge est de $2 \cdot 10^{-14} \tau^{-1/2}$. Une grande marge de progression est donc encore possible. Rien ne s'oppose de manière fondamentale à l'obtention de performances de l'ordre de $1-2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ avec une horloge CPT compacte. Aussi, de nombreux aspects peuvent être envisagés pour améliorer grandement la compacité de ce type d'horloge. Dans cet esprit, FEMTO-ST a développé une architecture laser très simple constituée d'une diode laser unique, d'un modulateur électro-optique (EOM) d'intensité et d'une structure interférométrique type Michelson, permettant la détection de résonances CPT à fort contraste par la méthode dite de pompage « push-pull ». Des contrastes CPT de 78% ont été mesurés. De plus, il a été préliminairement démontré la possibilité de détecter des franges de Ramsey étroites (~ 100 Hz) en faisant interagir les atomes avec une séquence d'impulsions lumineuses générées directement via l'EOM. On autorise alors la détection d'un signal atomique à faible largeur de raie et fort contraste, conditions requises pour l'obtention d'une bonne stabilité de fréquence. Le projet EURAMET permettra donc d'associer et combiner les compétences et expériences respectives des laboratoires FEMTO-ST et SYRTE pour le développement d'une horloge atomique CPT de haute performance.

Abstract in English:

The goal of this project is the development of a high-performance Cs vapor cell atomic clock. This clock will be based on simple laser architecture system with a single diode laser, an intensity electro-optic modulator and a Michelson-type delay-line or polarization orthogonalizer system allowing the detection of high-contrast CPT resonances through the push-pull optical pumping scheme. High contrasts at the level of 78% have been measured. Moreover, the possibility to detect high-contrast and narrow Ramsey-CPT fringes will be investigated by using a pulsed Ramsey-CPT interrogation spectroscopy technique. The EURAMET MClocks project will allow to combine both competences of FEMTO-ST and SYRTE laboratories towards the development of a high-performance Cs cell microwave CPT clock.

Résultats marquants :

Nous avons développé une horloge CPT de haute performance basée sur le schéma de polarisation dit push-pull pour la détection de résonances CPT à fort contraste. Ce schéma de pompage peut être combiné à une technique d'interrogation pulsée de type Ramsey conduisant à la détection de franges de Ramsey-CPT. L'horloge montre aujourd'hui des performances de $2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ jusque 100 s. Ces performances sont à ce jour les meilleures performances mondiales reportées pour une horloge CPT. Les performances reportées récemment par l'horloge CPT à double-modulation mise en place au LNE-SYRTE sont proches.

Highlights:

We have developed a high-performance CPT atomic clock based on the push-pull optical pumping technique (PPOP) for the detection of high-contrast CPT resonances. This polarization scheme can be combined with a pulsed Ramsey interrogation for the detection of narrow Ramsey-CPT fringes. This CPT clock exhibits a fractional frequency stability of $2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ up to 100 s averaging time. These performances are to date the best performances ever reported for a CPT clock worldwide. Performances recently reported by the double-modulation CPT clock implemented in LNE-SYRTE are in the same range.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

- 1/ M. Abdel Hafiz and R. Boudot, A coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock based on push-pull optical pumping, *Journal of Applied Physics* 118, n° 124903 (2015).
- 2/ M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq and R. Boudot, Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser, *Optics Letters* 41, 13, 2982-2985 (2016).
- 3/ M. Abdel Hafiz, X. Liu, S. Guérandel, E. De Clercq and R. Boudot, A CPT-based Cs vapor cell atomic clock with a short-term fractional frequency stability of $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, *Journal of Physics Conference Series* 723, 1 :012013 (2016).
- 4/ M. Abdel Hafiz, G. Coget, P. Yun, S. Guérandel, E. De Clercq and R. Boudot A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock, *Journal of Applied Physics* 121, 104903 (2017).
- 5/ M. Abdel Hafiz, D. Brazhnikov, G. Coget, V. Yudin, A. Taichenachev, E. De Clercq and R. Boudot High-contrast sub-Doppler absorption spikes in a hot atomic vapor cell exposed to a dual-frequency laser field, *New Journal of Physics* 19, 073028 (2017).

Oral communications:

- 1/ M. Abdel Hafiz, R. Boudot Progress in the evaluation of a Cs cell CPT clock using push-pull optical pumping, *Proceedings of the European Frequency Time Forum*, 24-26 June 2014, Neuchatel (Switzerland).
- 2/ M. Abdel Hafiz, R. Boudot Preliminary results of a Cs vapor cell atomic clock using push-pull optical pumping, *Proceedings of the European Frequency Time Forum International Frequency Control Symposium*, 12-17 April 2015, Denver, Colorado.
- 3/ B. Francois, C. Calosso and R. Boudot, An ultra-low noise frequency synthesis chain for a high performance Cs vapour cell compact atomic clock, *Proceedings of the European Frequency Time Forum International Frequency Control Symposium*, 12-17 April 2015, Denver, Colorado.
- 4/ M. Abdel Hafiz, X. Liu, S. Guérandel, E. De Clercq and R. Boudot A CPT-based Cs vapor cell atomic clock with a short-term fractional frequency stability of $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, *Proceedings Frequency Standards and Metrology*,

October 2015, Potsdam, Germany.

5/ Moustafa Abdel Hafiz and Rodolphe Boudot A high-performance CPT-based Cs vapor cell atomic clock using push-

pull optical pumping, Proceedings of the European Frequency Time Forum , 04-07 April 2016, York (UK).

6/ Moustafa Abdel Hafiz and Rodolphe Boudot A high-performance CPT-based Cs cell atomic clock, Proceedings of the International Frequency Control Symposium , 09-12 May 2016, New-Orleans, Louisiana (USA).

7/ C. Calosso, B. Francois, S. Micalizio and R. Boudot, Local Oscillators and Digital Electronics for Compact Atomic Clocks, Microwave Technology and Technique Workshop, 03-05 April 2017, Noordwijk (The Netherlands).

8/ D. Brazhnikov, A. Taichenachev, V. I. Yudin, M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq and R. Boudot, Ultrahigh-Contrast Saturated-Absorption Resonance to Enhance Stability of CPT Atom Clocks, EFTF-IFCS Joint Meeting, 09-13 July 2017, Besancon, France.

9/ R. Boudot, M. Abdel Hafiz, B. Francois, G. Coget, M. Petersen, S. Guerandel, P. Yun, E. De Clercq, C. E. Calosso, S. Micalizio and R. Boudot, A high-performance cell-based microwave clock using push-pull optical pumping, EFTF-IFCS Joint Meeting, 09-13 July 2017, Besancon, France.

10/ C. E. Calosso, M. Gozzelino, E. Bertacco, S. Micalizio, B. Francois, R. Boudot, P. Yun, Generalized Electronics for Compact Atomic Clocks, EFTF-IFCS Joint Meeting, 09-13 July 2017, Besancon, France.

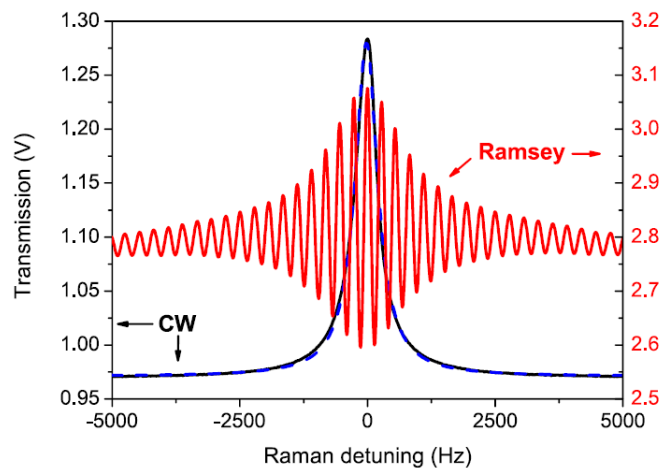
11/ M. Abdel Hafiz, G. Coget, M. Petersen, S. Guerandel, E. de Clercq, R. Boudot, A Ramsey-CPT spectroscopy-based Cs cell atomic clock, International Conference on Laser Spectroscopy ICOLS2017, 02-07 July 2017, Arcachon, France.

12/ D. Brazhnikov, M. Abdel Hafiz, G. Coget, A. Taichenachev, V. Yudin, E. de Clercq, R. Boudot³, Investigation of the high-contrast sub-Doppler absorption spikes observed in a cesium vapor cell under the dual-frequency regime, International Conference on Laser Spectroscopy ICOLS2017, 02-07 July 2017, Arcachon, France.

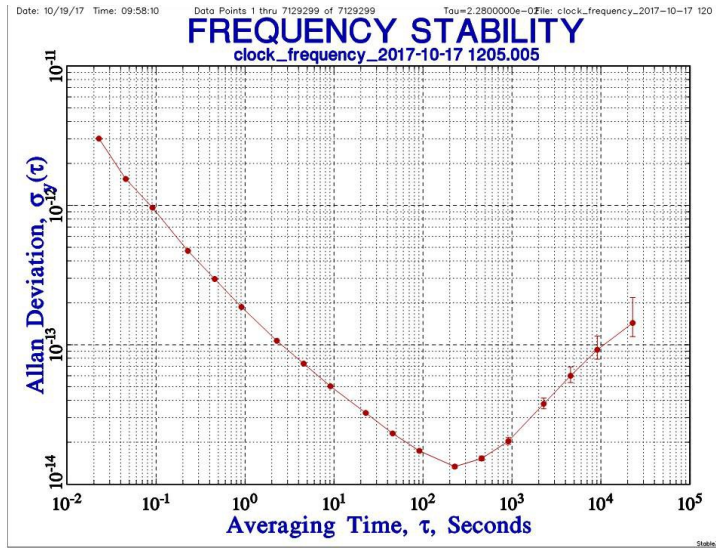
Invited talks:

1/R. Boudot, M. Abdel Hafiz, B. Francois, G. Coget, M. Petersen, S. Guerandel, P. Yun, E. De Clercq, C. E. Calosso, S. Micalizio and R. Boudot, A high-performance cell-based microwave clock using push-pull optical pumping, EFTF-IFCS Joint Meeting, 09-13 July 2017, Besancon, France.

Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



Continuous CPT resonance or Ramsey-CPT fringes detected in the Cs vapour cell.



Allan deviation of the push-pull CPT clock, in august 2017.