

## Laser ultra-stable à l'aide de cristaux dopés terre-rares à température cryogénique

### Ultra-stable laser based on rare-earth-doped crystal at cryogenic temperature

**Porteur(s) :** B. Fang (SYRTE)

**Partenaire(s) :** J. Millo (FEMTO-ST)

#### Résumé du projet en Français (mise à jour 2019) :

Les cristaux dopés aux ions de terres rares constituent un système prometteur pour la métrologie temps-fréquence de la nouvelle génération. Avec un choix approprié de dopant et matrice cristalline, un trou spectral étroit de l'ordre de quelques kHz de large peut être réalisé à des températures cryogéniques, avec une durée de vie d'environ un jour à 4K. Un refroidissement supplémentaire par dilution à l'hélium jusqu'à la gamme mK prolonge la durée de vie de ces trous spectraux de plusieurs mois, et doit permettre de réduire la largeur de raie jusqu'à ~10Hz, ce qui en fait d'excellents candidats pour la stabilisation de la fréquence de laser. La limite fondamentale d'un tel système est inconnue, mais on estime qu'elle est inférieure à  $10^{-18}$  en stabilité relative de fréquence à 1 s, surpassant largement la technologie existante basée sur les cavités de Fabry-Perot. Au laboratoire LNE-SYRTE, un montage expérimental dédié avec un cryostat standard jusqu'à 3 K a été réalisé au cours des dernières années, démontrant un laser asservi sur des trous spectraux avec une stabilité relative de fréquence de  $10^{-15}$  à 1 s. Un étage de dilution a été acheté et son installation est prévue pour le second semestre 2019. Parallèlement aux efforts visant à réduire le bruit de phase lié aux vibrations, nous avons l'intention d'établir une stabilisation de la fréquence du laser à un niveau sans précédent de  $10^{-18}$  à 1 s. Grâce aux techniques de transfert de pureté spectrale mises au point par le laboratoire LNE-SYRTE, il sera alors possible d'atteindre rapidement un bruit de projection quantique sur les horloges à réseau optique, établissant un nouveau paradigme dans la métrologie temps-fréquence. Les performances de ce laser seront utilisées pour améliorer la source optique de référence à 1,5  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde qui est disséminée par fibre-optiques via le réseau REFIMEVE+ vers plusieurs laboratoires partenaires.

#### Abstract in English (update 2019):

Rare-earth ion doped crystals is a promising system for next-generation time-frequency metrology. With an appropriate choice of dopant and crystalline matrix, narrow spectral hole on the order of a few kHz can be realized at cryogenic temperatures, with a life time of about a day at 4 K. Further cooling by means of helium dilution down to the mK range prolongs the life time to months, and decreases the achievable linewidth to ~100Hz, making these spectral holes excellent candidates for laser frequency stabilization. The fundamental limit of such a scheme is unknown but is estimated to be below  $10^{-18}$  in relative frequency stability at 1 s, largely surpassing existing technology based on Fabry-Perot cavities. At LNE-SYRTE, a dedicated experimental set-up with a standard cryostat down to 3 K has been realized in the past years, demonstrating a spectral hole locked laser with relative frequency stability at  $10^{-15}$  at 1 s. A dilution stage has been purchased and its installation is planned for the second half of 2019. Together with efforts to reduce the vibration-related phase noise, we intend to establish laser frequency stabilization at an unprecedented level of  $10^{-18}$  at 1 s. With spectral purity transfer techniques pioneered by LNE-SYRTE, it will then be possible to quickly reach quantum projection noise on the optical lattice clocks, establishing a new paradigm in time-frequency metrology. The performance of our laser will also improve the optical reference that is disseminated by long-haul optical fiber links to various FIRST-TF partners via the REFIMEVE+ network.

### Résultats marquants (mise à jour 2017) :

Il s'agit du montage de zéro d'un nouveau dispositif. Au LNE-SYRTE, le dispositif, avec l'aide financière du Labex et des autres co-financeurs, nous avons installés un nouveau laboratoire dédié (environnement dépoussiéré, thermo-régulé, hygro-régulé), équipé d'une table optique, d'un cryostat 4K à circuit fermé et très haute stabilité de température et de vibration. Un système laser à diode en cavité étendue à 1160 nm a été développé et une cavité ultra-stable de très haute finesse pour la pré-stabilisation du laser installée. Un système doubleur de fréquence de 1160 nm vers 580 nm a été également réalisé qui fournit plusieurs mW de puissance utile pour la spectroscopie de trous brûlés de l'Eu:YSO. La chaîne laser à 1160nm est également connectée à un lambda-mètre de haute performance du laboratoire et au système de peigne de fréquences optiques afin de caractériser sa fréquence optique et ses performances métrologiques (stabilité, largeur de raie optique, etc.).

Les premiers signaux de trous brûlés dans l'Eu:YSO ont été obtenus en 2013. Le système laser a également depuis été asservi sur la cavité de référence ultra-stable et nous travaillons actuellement à la réalisation de trous brûlés spectraux à très haute résolution. Un système de génération de forme d'onde arbitraire programmable en temps réel par FPGA contrôlé par ordinateur a été également approvisionné et est en cours d'implémentation sur le dispositif expérimental. A FEMTO-ST une enceinte de cryostat à tube pulsé de prochaine génération a été conçue, approvisionnée et est en cours d'assemblage. Celle-ci permettra de mettre l'échantillon cristallin dans un environnement de très faible vibration, de très haute stabilité en température, et sous une pression d'Hélium contrôlée afin d'atteindre les conditions « magiques » de température et pression permettant d'annuler au premier ordre l'effet des instabilités de température résiduelle sur la position des raies étroites spectrales de trou brûlé.

En 2016 et 2017, nous avons obtenus des structures de trou brûlé étroites de 4kHz FWHM environ et pu démontrer le principe d'un asservissement du laser sur ces trous brûlés avec une stabilité démontrée de  $2.10^{-14}$  à 1s. Les travaux se poursuivront maintenant pour aller vers l'amélioration des performances à court terme via l'optimisation des techniques d'interrogation et d'asservissement, et de la stabilité environnementale du cristal dopé terre-rare à température cryogénique.

### Highlights (update 2017):

We are building a new experiment from scratch aiming at realizing an ultra-stable laser based on narrow spectral features photo-imprinted in a rare-earth-doped crystal at cryogenic ( $< 4$  K) temperatures. This technology, novel in its application to high precision measurement and frequency metrology, has the potential to go beyond the existing room temperature Fabry-Perot stabilized lasers that are commonly used in optical clocks experiments. Ultimately, we want to realize a laser with stability in the  $10^{-17}$  level at 1s, and transfer the spectral purity thus obtained to other wavelengths (by use of an optical frequency comb), in particular that used for probing optical lattice clocks, which would allow them to reach their fundamental limit set by the quantum projection noise.

In 2016 and 2017, we have obtained experimentally spectral features as narrow as 4 kHz and demonstrated locking a laser to such narrow spectral holes with a measured stability of  $2.10^{-14}$  at 1s. The work effort is now settings toward optimizing the probing and servo technique, as well as the environmental stability of the cryogenically cooled rare-earth-doped crystal, in order to reach lower instability levels.

## Publications and communications linked with the funded project (update 2017):

### *Peer-reviewed articles:*

O. Gobron, K. Jung, N. Galland, K. Predehl, R. Le Targat, A. Ferrier, P. Goldner, S. Seidelin and Y. Le Coq, "Dispersive heterodyne probing method for laser frequency stabilization based on spectral hole burning in rare-earth-doped crystals", *Optics Express* 25, 15539.

### *Proceedings:*

O. Gobron, K. Jung, K. Predehl, D. Nicolodi, R. Le Targat, S. Seidelin, A. Ferrier, P. Goldner and Y. Le Coq, "Toward a highly stable master laser for interrogation of SYRTE's Sr and Hg optical lattice clocks, CLEO 2016, San Jose, CA, USA 2016.

### *Invited talks:*

Y. Le Coq, O. Gobron, K. Jung, K. Predehl, R. Le Targat, A. Ferrier, P. Goldner, S. Seidelin, "Rare-earth stabilized laser for optical clocks", *Physics of Quantum Engineering 2017, Snowbird Utah, USA, 2017.*

### *Others:*

Poster at EFTF/IFCS 2017 (Besançon)

Poster at EFTF/IFCS 2013 (Prague)

Poster "journées nano-K 2013"

Poster "journée IFRAF 2013"

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

SHB laser stabilisation at SYRTE: Setup Sept 2013

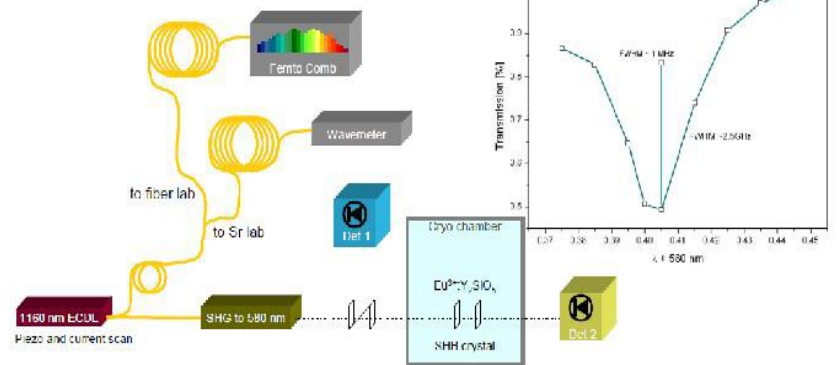
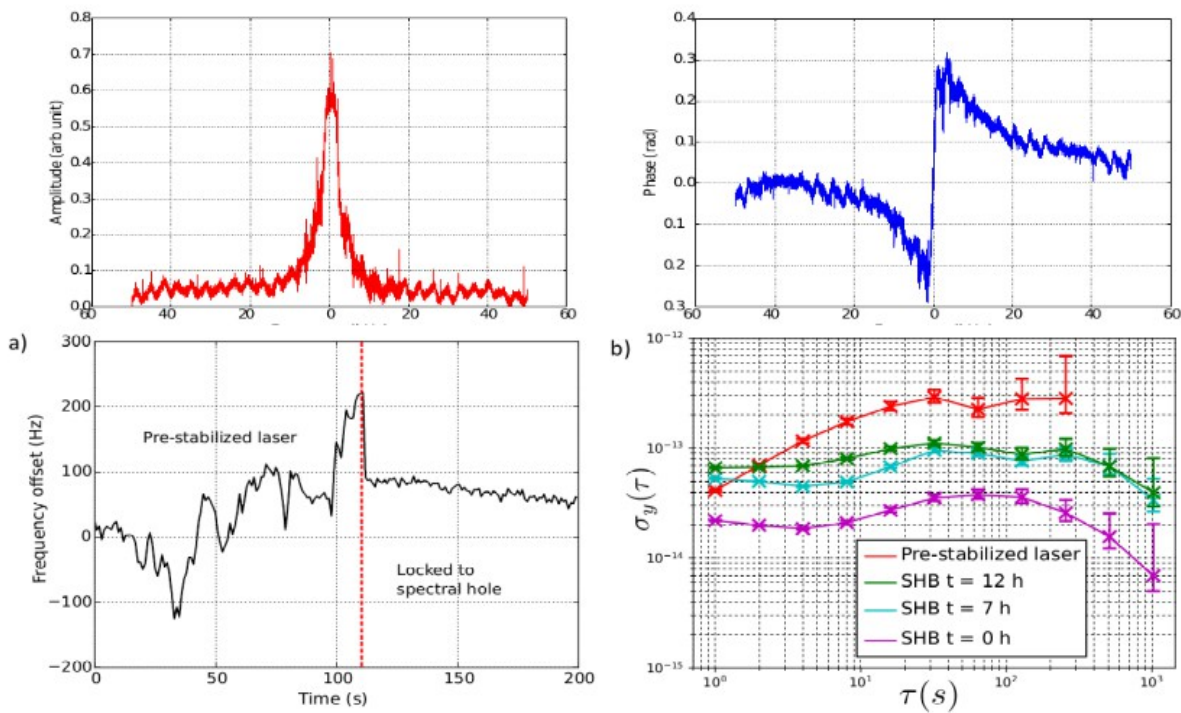


Schéma du montage expérimental au LNE-SYRTE ayant permis d'observer les premiers signaux expérimentaux de trous brûlés dans  $\text{Eu}:\text{YSO}$ . A droite : spectre d'absorption obtenus par élargissement inhomogène avec un trou brûlé en son centre. Dans cette première expérience, le trou brûlé à une largeur de 1 MHz environ car le laser l'ayant photo-imprimé n'était pas encore pré-stabilisé sur cavité Fabry-Pérot de très haute finesse.



Signaux d'absorption (en haut à gauche) et de dispersion (en haut à droite) correspondant à un trou brûlé spectral de 4 kHz utilisé pour l'asservissement du laser. En bas à gauche, trace temporelle du signal de mesure de stabilité de fréquence du laser avant et après asservissement sur le trou brûlé spectral. En bas à droite, stabilité correspondante après stabilisation, observée à divers moment d'un asservissement appliqué pendant plusieurs heures en continu. La dégradation observée sur les temps longs correspond à l'élargissement du trou brûlé spectral au cours du temps, par processus de « sur-brûlage » par le laser de sonde.