

Porteur(s) : O. Acef (SYRTE)

Partenaire(s) : F. Du Burck (LPL), R. LeGoff (SODERN)

Résumé du projet en Français :

Les lasers IR stabilisés en fréquence, dans des configurations expérimentales compactes, sont fortement impliqués et/ou recherchés pour de nombreuses applications spatiales/embarquées ou terrestres, en métrologie des fréquences, télécommunications optiques, liens optiques cohérents longue distance, etc. L'existence de nombreux composants optiques fibrés, issue du boom technologique des télécommunications optiques, rend particulièrement attractive l'utilisation de lasers opérant au voisinage de 1,5 μm qui présentent un niveau de TRL inégalé dans d'autres régions du spectre optique. Ces lasers présentent un très faible bruit de phase intrinsèque avant toute stabilisation électronique, sont très compacts et fibrés optiquement, présentent une faible absorption dans l'atmosphère terrestre, et sont à fort degré de sécurité oculaire.

Néanmoins, l'absence de références atomiques ou moléculaires de grand facteur de qualité (Q), qui soient directement en coïncidence avec les bandes d'émission de ces lasers IR, pour les besoins de la stabilisation de fréquence, a longuement pénalisé les performances métrologiques des lasers Telecom, en termes de stabilité de fréquence. Les raies atomiques ou moléculaires de grand facteur de qualité Q sont principalement localisées dans le domaine visible du spectre électromagnétique. La molécule d'iode $^{127}\text{I}_2$ présente justement une bande d'absorption très intense dans le domaine visible. Les transitions hyperfines des raies d'absorption sont particulièrement étroites et intenses dans le vert ($\sim 510 \text{ nm} - 550 \text{ nm}$) et sont les plus intéressantes d'un point de vue métrologique, pour asservir la fréquence de divers lasers selon une technique simple de spectroscopie sub-Doppler.

Le projet de stabilisation de lasers IR sur l'iode moléculaire, nécessite donc comme prérequis, une opération de triplage de fréquence -en mode continu- afin de relier la bande Telecom ($\sim 1.5 \mu\text{m}$) au domaine vert du spectre électromagnétique ($\sim 514 \text{ nm}$) pour les besoins de stabilisation en fréquence. Cette opération de triplage de fréquence est basée sur deux processus non linéaires cascades utilisant des cristaux de Niobate de Lithium : un doublage de fréquence (SHG : $\omega + \omega \rightarrow 2\omega$) suivi d'une somme de fréquences (SFG : $\omega + 2\omega \rightarrow 3\omega$).

Notre objectif de développement d'un laser stabilisé compact et majoritairement fibré en vue d'utilisation hors laboratoire, a buté sur la difficulté d'acquérir le cristal nécessaire pour réaliser l'opération somme de fréquences (SFG) dans un mode fibré. Le soutien financier du Labex FIRST-TF en 2013, nous a permis de contourner une première difficulté qui consistait à acquérir le cristal SFG auprès d'un fournisseur japonais, leader du domaine. Cette étape a permis de développer au laboratoire SYRTE un dispositif laser triplé en fréquence fibré, qui fait aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant de la part d'industriels pour de nombreuses applications (voir figure ci-dessous). Ce triplage de fréquence a abouti à un facteur de conversion non linéaire $\eta = P_{3\omega}/P_{\omega} \sim 36\%$, jamais démontré auparavant pour un processus de triplage de fréquence en mode continu. Une puissance harmonique de 300 mW a été générée à $\sim 514 \text{ nm}$ à partir d'une puissance fondamentale de 800 mW à $\sim 1542 \text{ nm}$. A noter que seule une puissance optique d'une dizaine de mW dans le vert est nécessaire pour les besoins de stabilisation en fréquence du laser IR sur l'iode. Le volume du dispositif de triplage que nous avons développé n'excède pas 4 l, et la consommation électrique utilisée pour réaliser ce triplage est de 20 W. L'ensemble de ces caractéristiques illustrent la pertinence et le potentiel du dispositif pour des applications hors laboratoire. Nous avons ensuite entrepris la stabilisation en fréquence du laser IR à 1542 nm sur une transition hyperfine de l'iode au voisinage de 514 nm. Nous avons abouti à une stabilité de fréquence de $4.8 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ avec un minimum de fluctuations résiduelles de 6×10^{-15} pour un temps d'intégration $t > 50 \text{ s}$.

Suite à ces résultats, nous avons décidé d'accroître la compacité du dispositif global « laser triplé + stabilisation sur l'iode ». Nous visons dans cette extension du projet à fibrer l'intégralité du dispositif et augmenter le niveau global du niveau de TRL. Cet objectif a nécessité de modifier le mode d'interaction avec la vapeur d'iode en cellule, en

transférant dans le domaine IR la modulation de la phase du signal optique pour les besoins de stabilisation, réalisée auparavant dans le visible. Nous avons sollicité de nouveau le soutien du Labex FIRST-TF en 2015, afin de développer un nouveau banc laser triplé et modulé en fréquence. Le fournisseur japonais de cristaux de Niobate ayant refusé de nous fournir de nouveau le cristal SFG, qui est une véritable « *pierre angulaire* » du projet, nous avons initié avec le soutien du Labex FIRST-TF le développement du savoir-faire nécessaire par une PME francilienne pour développer ce cristal SFG fibré. Cette opération a été réalisée avec succès, et le procédé bien maîtrisé est, depuis, pressenti pour de nouvelles applications.

Abstract in English:

This project aims to develop a compact iodine-based optical frequency standard operating in the Telecom domain ($\sim 1.5 \mu\text{m}$), using very narrow and intense iodine hyperfine lines located in the green range of the optical domain. To bridge the frequency gap between IR and visible ranges, we develop an efficient frequency tripling process using two cascaded Lithium Niobate nonlinear crystals. A nonlinear conversion efficiency $\eta = P_{3\omega}/P_{\omega} \sim 36\%$ is obtained, corresponding to a harmonic power of 300 mW at 514 nm generated with 800 mW only of IR fundamental power at 1542 nm. This result is to our knowledge the best efficiency ever demonstrated for a continuous wave frequency tripling process. The total power consumption needed for this frequency tripling process is 20 W.

Following this development, a very compact laser spectroscopy setup was built, based on a short sealed quartz cell, which contains the molecular iodine vapor. An optical power lower than 10 mW in the green is sufficient to carry out the iodine vapor interrogation, and to detect the hyperfine saturation transitions, which have a high quality factor around 514 nm ($Q > 2 \times 10^9$).

A frequency stability at the level of $4.5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ with a minimum value of 6×10^{-15} from 50 s to 100 s is demonstrated. This frequency stability is the best result ever conferred to a laser diode at $1.54 \mu\text{m}$, using in a simple way a Doppler-free iodine spectroscopy technique.

Résultats marquants :

- Stabilisation en fréquence d'une source laser au voisinage de $1.54 \mu\text{m}$ sur une transition hyperfine de l'iode moléculaire à 514 nm.
- Démonstration d'un triplage de fréquence très efficace en mode continu: $\eta = P_{3\omega}/P_{\omega} \sim 36\%$.
- Ce coefficient de conversion non linéaire de l'infrarouge vers le visible extrêmement élevé n'a jamais été rapporté avant ce travail.
- Le volume du dispositif de triplage de fréquence est très compact ($\sim 4\text{l}$) et la consommation électrique totale est très faible ($\sim 20 \text{ W}$).
- Un niveau de stabilité de fréquence de la source laser IR au niveau de $4.8 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ avec un minimum d'instabilités de fréquence résiduelles de 6×10^{-15} en valeur relative a été démontré.
- Les performances obtenues sont compatibles avec les besoins de missions spatiales nécessitant des liens optiques ultrastables en fréquence (LISA, etc ...)

Highlights:

- Ultra stable optical frequency standard development at $1.54 \mu\text{m}$ using narrow and intense hyperfine lines located at $\sim 514 \text{ nm}$.
- Demonstration of an efficient CW-frequency tripling process to bridge the frequency gap between IR and green ranges of the optical domain : $\eta = P_{3\omega}/P_{\omega} \sim 36\%$.
- Best nonlinear efficiency ever demonstrated for continuous wave frequency tripling process.
- Very compact ($\sim 4\text{l}$) and low power consumption ($\sim 20 \text{ W}$) frequency tripling optical setup.
- Frequency stabilization at level of $4.8 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ with a minimum residual fluctuations of 6×10^{-15} .
- This performance could meet various space applications requirements (LISA, etc ...)

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

- [1]- **N. Chiodo** et al., "Optical phase-locking of two infrared continuous wave lasers separated by 100 THz", Optics letters Vol. 39, N°10, May 15, 2014. <https://doi.org/10.1364/OL.39.002936>
- [2]- **Ch. Philippe** et al., « Efficient third harmonic generation of a CW-fibered 1.5 μm laser diode », Appl. Phys. B 122 (10) 265 (2016). HAL Id: hal-01382719, <http://hal.upmc.fr/hal-01382719>
- [3]- **J. Hrabina**, et al., « Spectral properties of molecular iodine in absorption cells filled to specified saturation pressure », *Appl. Opt.* 2014 Nov. 1;53(31):7435-41.
<https://doi.org/10.1364/AO.53.007435>
- [4]- **J. Hrabina** et al., « Comparison of molecular iodine spectral properties at 514.7 nm and 532 nm », Meas. Science Review, Vol. 14, N° 4, 2014. HAL Id: hal-01332084, <http://hal.upmc.fr/hal-01332084>

Patents:

- #1: CNRS_05759-01 (2014) & PCT/EP2014/057633
#2: CNRS_07426-01 (2015) & PCT/EP2016/056434

Proceedings:

- * **Ch. Philippe** et al., "Frequency tripled 1.5 μm stabilized to iodine hyperfine line in the 10-15 range", Proceedings of EFTF '2016, <https://doi.org/10.1109/EFTF.2016.7477827>
- * **Ch. Philippe** et al. "1.5 μm Optical frequency standard iodine stabilized in the 10-15 range for space applications", Proceedings of 2017 joint EFTF & IFCS symposium, July 2017
<https://doi.org/10.1109/FCS.2017.8088929>
- * **J. Hrabina** et al., "Iodine absorption cells quality measurements", Proceedings of EFTF '2016
<https://doi.org/10.1109/EFTF.2016.7477845>

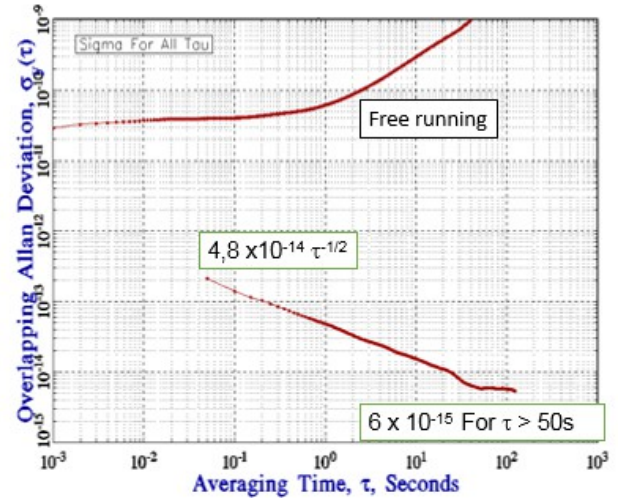
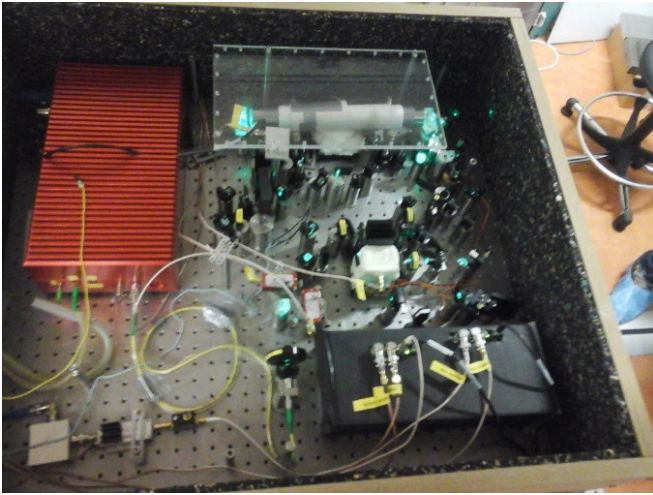
Oral communications:

- * **Ch. Philippe** et al., "Efficient frequency tripling of a telecom laser diode stabilized to iodine line at 515 nm in the 10⁻¹⁵ range", 30th European Frequency and Time Forum, EFTF, April 2016, York UK.
- * **Ch. Philippe** et al., "Compact frequency stabilized 1.5 μm laser for space applications", 2017 EFTF and IFCS symposium, July 2017, Besançon, France
- * **Ch. Philippe** et al., "Compact-fibered optical frequency standard at 1542 nm", 32nd URSI GASS, Montreal, 19-26 August 2017

Others:

- * **N. Castagna** et al., « Iodine stabilized laser source » Poster joint UFFC, EFTF and PFM symposium '2013, July 2013, Prague, Czech Republic.
- * **Ch. Philippe** et al., « A compact frequency stabilized Telecom laser diode for space applications », International Conference on Space Optics ICSSO'2016, October 2016, Biarritz France
- * **Ch. Philippe** « Laser 1.5 μm stabilisé sur l'iode pour applications spatiales », Prix poster étudiant du CNES 2016, Octobre 2016, Toulouse-France.
- * **J. Gillot** et al., « Iodine stabilized 1.5 μm laser », International conference on laser spectroscopy, ICOLS 2017 July 2017, Arcachon France

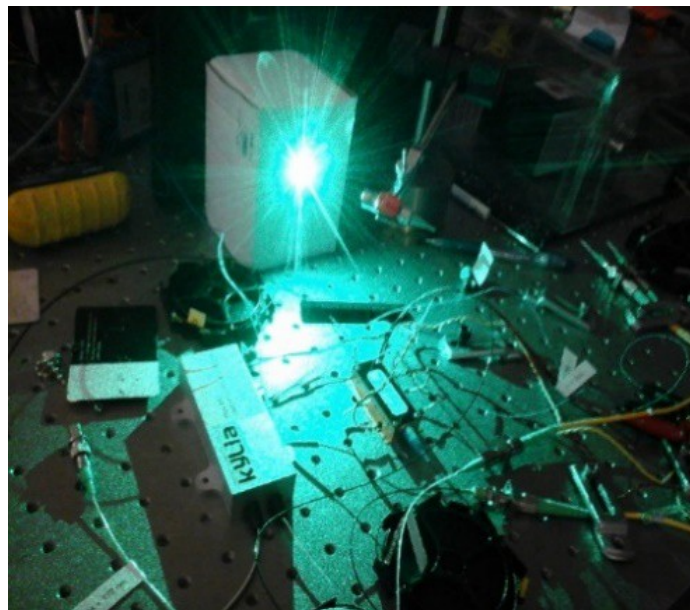
Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



A gauche : Laser triplé en fréquence et stabilisé sur l'iode développé au SYRTE en 2014.

Le laser triplé est la boîte rouge à gauche de la figure (volume : env. 4 l). La cellule d'iode est en haut à droite.

A droite : Stabilité de fréquence conférée au laser opérant à 1542 nm, par stabilisation sur une transition Hyperfine de l'iode moléculaire à 514.5 nm.



Nouveau banc laser triplé et modulé en fréquence dans l'IR développé avec le soutien du Labex FIRST-TF