

# OSCILLATEUR PARAMÉTRIQUE FIBRÉ À DÉRIVE DE FRÉQUENCE : PERFORMANCES ET DYNAMIQUE

Tristan Guezennec<sup>1,2</sup>, Saïd Idlahcen<sup>2</sup>, Laurent Provino<sup>1</sup>, Adil Haboucha<sup>1</sup>, Thomas Godin<sup>2</sup>,  
Ammar Hideur<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Photonics Bretagne, Lannion, France

<sup>2</sup> CORIA, UMR 6614 CNRS - INSA Rouen - Université de Rouen Normandie, Rouen, France

thomas.godin@coria.fr

## RÉSUMÉ

Nous rapportons la réalisation d'un oscillateur paramétrique fibré à dérive de fréquence (FOPCPO) ainsi qu'une étude de ses performances en termes d'énergie, d'accordabilité et de stabilité. Le FOPCPO développé génère des impulsions signal autour de 810 nm avec des énergies atteignant 510 nJ à une fréquence de répétition de 1 MHz. Les impulsions idler, quant à elles centrées à 1410 nm, ont été comprimées à des durées inférieures à la picoseconde et leur dynamique a été capturée en utilisant la technique de transformée de Fourier dispersive.

**MOTS-CLEFS :** FOPCPO ; Oscillateurs Paramétriques ; Laser à fibre ; Optique non-linéaire

## 1. INTRODUCTION

Les sources paramétriques délivrant des impulsions courtes et de haute énergie représentent une technologie clé dans de nombreux domaines industriels et scientifiques. Particulièrement, la combinaison de ces sources avec le concept d'amplification à dérive de fréquences a permis l'obtention d'énergies dépassant le mJ dans des sources basées sur les non-linéarités d'ordre 2 dans les cristaux [1]. Le concept d'amplification paramétrique à dérive de fréquence (OPCPA) a été appliqué aux sources fibrées et a déjà permis l'obtention d'impulsions dépassant le  $\mu\text{J}$  [2, 3] en utilisant le mélange à 4 ondes dégénéré. D'un autre côté, l'utilisation d'impulsions à dérive de fréquence dans des oscillateurs paramétriques fibrés (FOPCPO) se montre prometteuse pour la montée en énergie, tout en permettant une grande accordabilité et en s'affranchissant de sources *seed* extérieure [4]. Nos récents travaux [5] ont ainsi permis l'obtention d'impulsions atteignant le  $\mu\text{J}$  d'énergie à un taux de répétition élevé (1 MHz) dans un FOPCPO en régime de dispersion normale, permettant de remplir les conditions nécessaires pour l'utilisation de ces sources dans un contexte d'imagerie Raman stimulée (SRS) [6]. L'objectif des travaux présentés ici est de confirmer le potentiel de ces sources en terme d'énergie, de durées d'impulsions et de stabilité.

## 2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le FOPCPO, présenté sur la Fig. 1, est pompé par un laser CPA à fibre dopée ytterbium développé à Photonics Bretagne et délivrant des impulsions étirées à 500 ps ( $\approx 100$  fs en limite de Fourier), centrées à 1036 nm, à une cadence de 968 kHz. Les impulsions de pompe sont injectées dans la cavité au travers d'un miroir dichroïque et le gain paramétrique est obtenu dans une fibre microstructurée air-silice développée à Photonics Bretagne (SUP5-125, Product Line Perfos®). La fibre, longue de 8 cm, présente un diamètre de cœur de 5  $\mu\text{m}$  ( $\gamma = 15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ) et un zéro de dispersion à 1055 nm. Les extrémités de la fibre sont protégées par le collapsage des trous d'air préalablement à leur clivage, ce qui leur permet de résister aux puissances crêtes et moyennes importantes. La cavité est fermée par environ 200 m de fibre microstructurée air-silice à maintien de polarisation et à grande aire modale (ESM10-PM, Product Line Perfos®), présentant un diamètre de cœur de 10  $\mu\text{m}$ , tout en assurant une propagation monomode sur une grande plage de longueurs d'onde. Cette fibre permet donc au FOPCPO d'ajuster son taux de répétition sur le laser de pompe, tout en assurant un bon recouvrement spatial des impulsions et une faible phase

non-linéaire accumulée. Une ligne à retard est ajoutée à la cavité afin de remplir deux fonctions : ajuster finement la longueur de la cavité afin de faire correspondre au mieux sa fréquence de répétition à celle du laser de pompe, et permettre d'accorder les longueurs d'ondes des impulsions issues du FOPCPO par filtrage dispersif. Des lames de phases sont introduites dans la cavité pour contrôler le taux de réinjection dans la cavité, d'assurer l'injection du faisceau selon un axe propre de la fibre à maintien de polarisation et d'optimiser la conversion paramétrique par mélange à quatre ondes dans la fibre non-linéaire. Enfin, le miroir dichroïque permet de rejeter l'idler et la pompe non consommée issue de la fibre de rétroaction, rendant ainsi la cavité résonnante sur le signal.

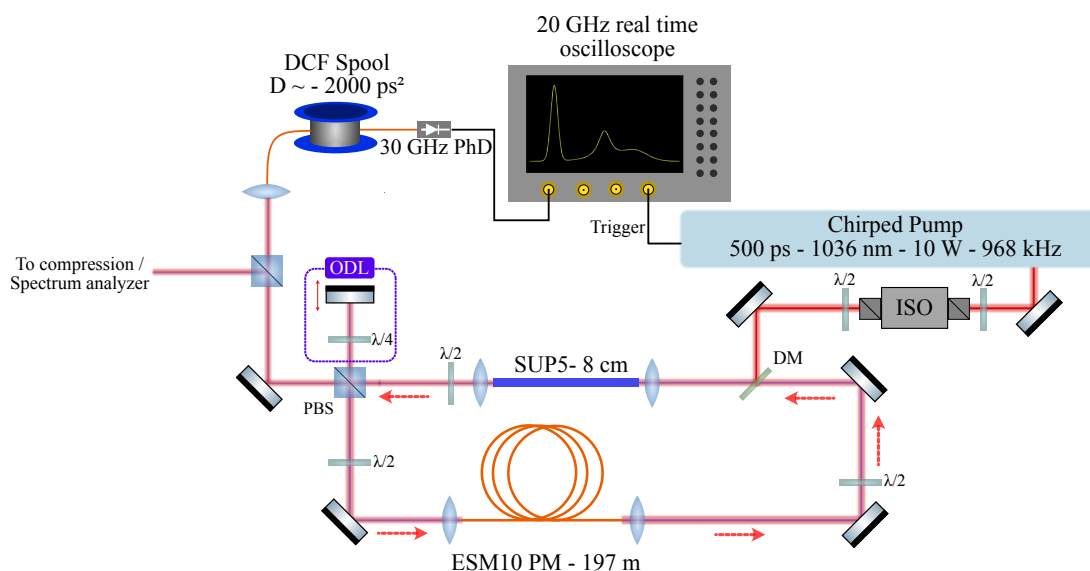


FIGURE 1 : Dispositif expérimental. ISO : isolateur, DM : Miroir dichroïque, PBS : Cube séparateur de polarisation, ODL : Ligne à retard. PhD : Photodiode. DCF : Fibre à compensation de dispersion

Les impulsions issues du FOPCPO sont filtrées selon la longueur d'onde d'intérêt, puis sont mesurées à l'analyseur de spectre optique, comprimées dans un montage de type Treacy (1200 traits/mm), ou injectées dans une bobine de 20 km de fibre à compensation de dispersion (DCF). Les impulsions ainsi injectées sont mesurées à l'oscilloscope rapide (20 GHz) au travers d'une photodiode (30 GHz). Ce dispositif permet de mesurer le spectre de chaque impulsion indépendamment par transformée de Fourier dispersive (DFT), et donc de s'assurer de la cohérence impulsion à impulsion.

### 3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les caractéristiques des impulsions issues du FOPCPO sont présentées sur la Fig. 2. Le signal est accordable sur une plage de 50 nm autour de 810 nm, avec une énergie maximale de 510 nJ, tandis que l'idler couvre une plage de 120 nm autour de 1410 nm, et une énergie maximale de 200 nJ. Les deux impulsions présentent des durées étirées de l'ordre de 150 ps. Il est important de noter que le cube séparateur de polarisation de sortie du FOPCPO est optimisé pour une transmission allant de 700 à 1300 nm, il est donc possible que les performances énergétiques de l'idler soient impactées par cette transmission. Les impulsions idler ont ensuite été comprimées à une durée inférieure à la picoseconde, comme représenté sur la trace d'autocorrélation de la Fig. 2(b). La largeur à mi-hauteur des impulsions comprimées est estimée à 550 fs en supposant un profil temporel Gaussien. La largeur spectrale correspondante est de 5 nm indiquant que les impulsions comprimées sont proches de la limite théorique. Afin de confirmer la stabilité du FOPCPO, les traces temporelles d'un millier d'impulsions idler ont été enregistrées après dispersion dans la bobine de DCF, correspondant aux spectres tir-à-tir de ces impulsions. Nous observons ainsi sur la Fig. 2 que la stabilité des impulsions à chaque tour de cavité est satisfaisante. Ces performances (énergie, durée, accordabilité) confirment donc la pertinence du concept d'oscillateur

paramétrique fibré à dérive de fréquence pour des applications nécessitant la production d'impulsions synchronisées, telles que l'imagerie ou la spectroscopie non-linéaires. Plus de détails concernant ces performances mais aussi l'analyse du bruit du FOPCPO via des mesures radiofréquence seront présentés lors de la conférence.

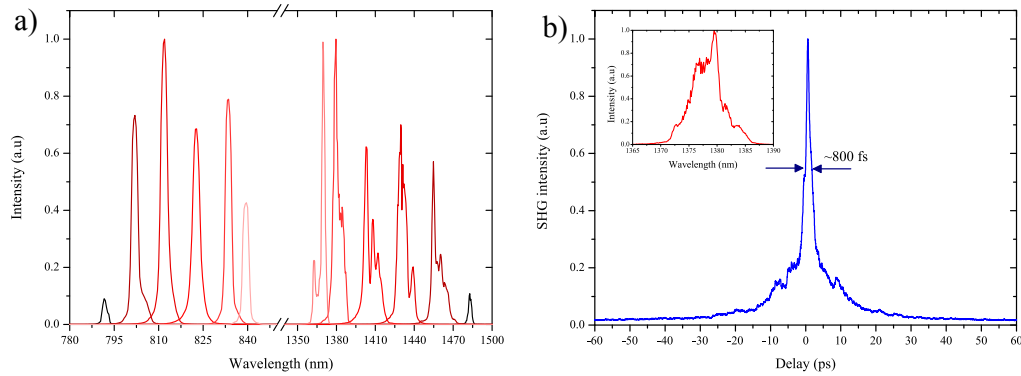


FIGURE 2 : a) Accordabilité du FOPCPO : idler et signal. b) Trace d'autocorrélation après compression de l'idler. Insert : Spectre correspondant.

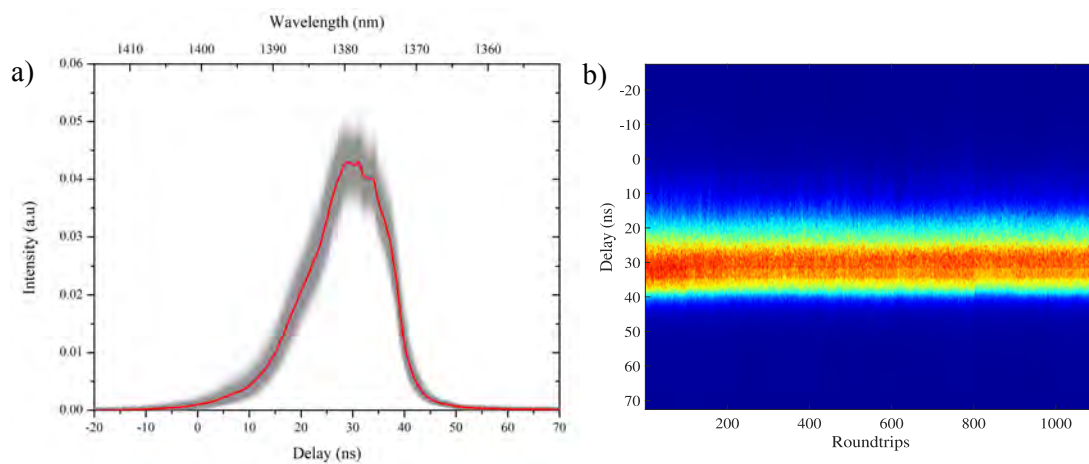


FIGURE 3 : a) Superposition (gris) et moyenne (rouge) de 1100 impulsions enregistrées par transformée de Fourier dispersive. b) Représentation de l'évolution de ces mêmes impulsions au cours du temps.

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Dubietis and A. Matijošius, "Table-top optical parametric chirped pulse amplifiers : past and present," *Opto-Electronic Advances*, vol. 6, pp.220046-220046, 2023
- [2] P. Morin, *et al.*, "μJ-level Raman-assisted fiber optical parametric chirped-pulse amplification," *Opt. Lett.*, vol. 43(19), pp. 4683-4686, 2018.
- [3] L. Lafargue, *et al.*, "All-polarization maintaining and high-energy fiber optical parametric chirped-pulse amplification system using a solid core photonic hybrid fiber," *Opt. Lett.*, vol. 47(17), pp. 4347-4350, 2022.
- [4] R. Becheker, *et al.*, "High-energy normal-dispersion fiber optical parametric chirped-pulse oscillator", *Opt. Lett.*, vol. 45, pp. 6398-6401, 2020.
- [5] T. Guezennec, *et al.*, "μJ-level normal-dispersion fiber optical chirped-pulse parametric oscillator," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, doi : 10.1051/jeos/2024006 (accepted)
- [6] T. Gottschall, *et al.*, "Fiber-based light sources for biomedical application of coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 9(5), pp. 435-451 (2015)