

# OSCILLATEURS PARAMÉTRIQUES FIBRÉS À DÉRIVE DE FRÉQUENCE : PERSPECTIVES ET APPLICATIONS POUR LA BIOPHOTONIQUE

Jérôme Quintin<sup>1,2</sup>, Tristan Guezennec<sup>3</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

<sup>3</sup> Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, UMR 7538, F-93430, Villetaneuse, France

thomas.godin@coria.fr

## RÉSUMÉ

Nous étudions le potentiel d'une plateforme expérimentale basée sur un oscillateur paramétrique optique fibré à dérive de fréquence (FOPCPO) pour la biophotonique. Cette source délivre des impulsions de haute énergie accordables sur une large plage spectrale au-delà des bandes des terres rares, compressibles à des durées sub-ps d'après simulations.

**MOTS-CLEFS :** FOPCPO ; Sources paramétriques ; Lasers à fibres ; Fibre non-linéaire

## 1. INTRODUCTION

Les sources paramétriques fibrées basées sur le mélange à quatre ondes constituent une alternative prometteuse aux systèmes solides plus complexes pour la biophotonique. L'imagerie non linéaire requiert en effet des sources ultrarapides accordables couvrant des bandes spectrales souvent inaccessibles aux fibres dopées aux terres rares [1, 2]. Des techniques telles que la microscopie multiphotonique permettent l'imagerie en profondeur d'échantillons biologiques avec une forte résolution et un bon rapport signal-à-bruit, tandis que l'imagerie Raman cohérente (CARS) offre une analyse spectroscopique directe sans marquage fluorescent. Dans ce contexte, les sources paramétriques fibrées permettent la génération d'impulsions ultracourtes accordables dans des régions spectrales difficilement accessibles autrement, tout en offrant des degrés de libertés supplémentaires comme la largeur spectrales ou la dérive de fréquence des impulsions générées. De récents travaux [1] combinant ces sources avec le concept d'amplification à dérive de fréquence ont démontré l'obtention d'impulsions de haute énergie ( $> 1 \mu\text{J}$ ) accordables à 1 MHz dans un FOPCPO en régime de dispersion normale. L'objectif des travaux présentés ici est d'évaluer le potentiel de ces sources pour l'imagerie Raman et la microscopie multiphotonique en termes d'énergie et de durée d'impulsion.

## 2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. La cavité paramétrique, résonante sur le signal, est pompée par un laser à verrouillage de modes, conçu en interne, délivrant des impulsions fortement étirées de 500 ps à 1038 nm, à une cadence de 968 kHz. L'amplification des impulsions est réalisée à l'aide d'une fibre à très large aire modale (VLMA-40-220-PM-YB, Product Line Perfos®) toute solide, dopée à l'ytterbium, et à maintien de polarisation (PM). Les impulsions de pompe sont injectées au travers d'un miroir dichroïque dans un tronçon de 8 cm de fibre micro-structurée air-silice (SUP5-125, Product Line Perfos®) également développée par Photonics Bretagne, présentant une longueur d'onde de dispersion nulle de 1055 nm et un diamètre de mode moyen de 4,3  $\mu\text{m}$  conduisant en un coefficient de non-linéarité de l'ordre de  $15 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ . La cavité est fermée par 197 m de fibre microstructurée air-silice à maintien de polarisation et à grande aire modale (ESM10-PM, Product Line Perfos®), présentant un diamètre de mode de 10  $\mu\text{m}$ , tout en assurant une propagation monomode sur une grande plage de longueur d'onde. Cette fibre permet ainsi d'ajuster le taux de répétition du FOPCPO avec celui du laser de pompe et de minimiser la phase non-linéaire accumulée. Une lame demi-onde est placée en amont afin de s'assurer que la polarisation du signal est alignée avec l'un des axes neutres de la fibre. Une ligne à retard vient

compléter le dispositif afin de remplir deux fonctions : ajuster finement la fréquence de répétition du FOPCPO et celle du laser de pompe, et permettre d'accorder les longueurs d'ondes issues du FOPCPO par filtrage dispersif [3]. Une dernière lame demi-onde est positionnée en sortie de l'ESM10-PM pour aligner la polarisation du signal et de la pompe afin de favoriser l'interaction non-linéaire dans la SUP5-125.

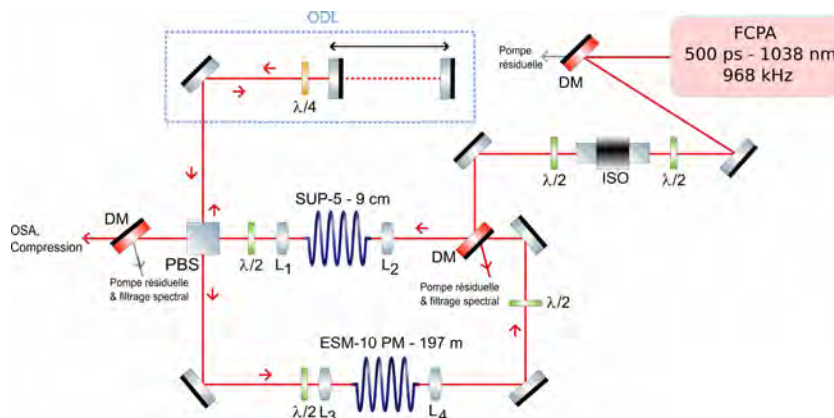


Figure 1: Dispositif expérimental. ISO : Isolateur. DM : Miroir dichroïque. PBS : Cube séparateur de polarisation. ODL : Ligne à retard. FCPA : Amplificateur à dérive de fréquence fibré.

Les impulsions issues du FOPCPO sont ensuite filtrées selon la longueur d'onde d'intérêt (idler ou signal) puis mesurées à l'analyseur de spectre optique.

### 3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'accordabilité du FOPCPO en régime d'oscillations paramétriques pour une énergie de pompage de 3,5  $\mu\text{J}$  est présentée sur la figure 2. Le signal présente une accordabilité de 60 nm autour de 815 nm avec une énergie maximale de 200 nJ, tandis que l'idler est accordable sur une plage de 120 nm autour de 1390 nm avec une énergie de 100 nJ.

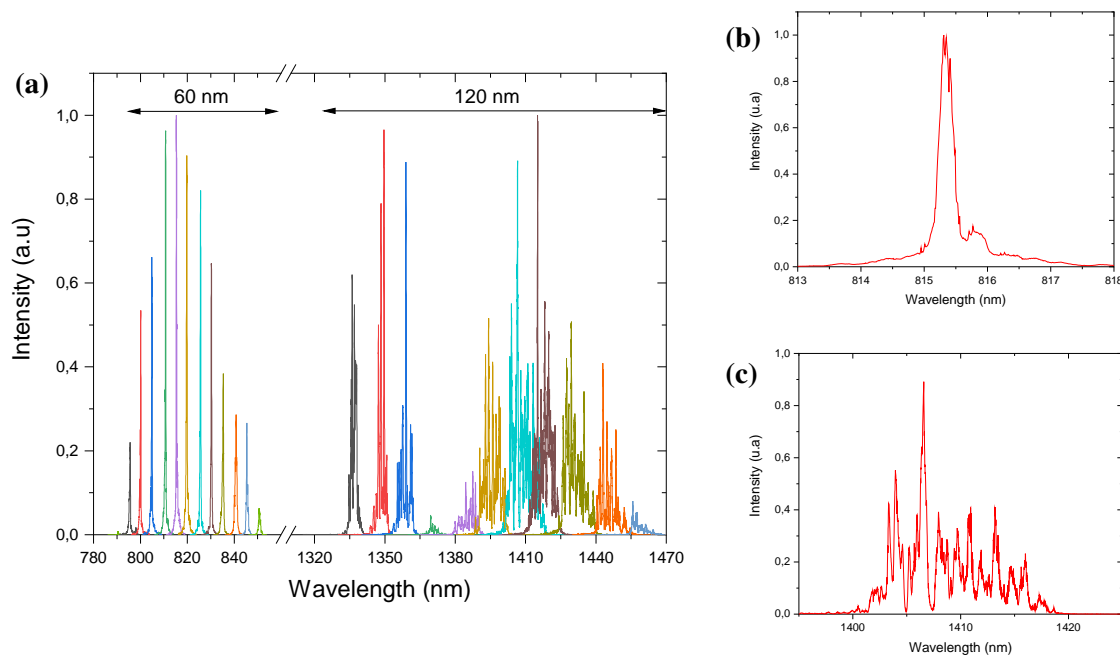


Figure 2: (a) Accordabilité du FOPCPO pour une énergie de pompage de 3,5  $\mu\text{J}$ . (b) Exemple de spectre du signal. (c) Exemple de spectre de l'idler.

#### 4. PLATERFORME DE SIMULATION

En parallèle de ces travaux, une plateforme de simulation modélisant une cavité paramétrique par résolution successive de l'équation de Schrödinger non linéaire généralisée a été mise en œuvre lors de précédents travaux. Ces simulations permettent d'évaluer l'influence de paramètres expérimentaux clés, tels que le taux de rétroaction et l'énergie de pompage, sur la stabilité des impulsions générées lors de la conversion paramétrique. Dans l'objectif de faire osciller le FOPCPO sur l'idler pour obtenir un signal large bande compressible à des durées sub-ps [4], un oscillateur paramétrique centré à 1440 nm a ainsi été simulé pour une énergie de pompage de 4,5  $\mu$ J, dont les résultats sont présentés sur la figure 3.

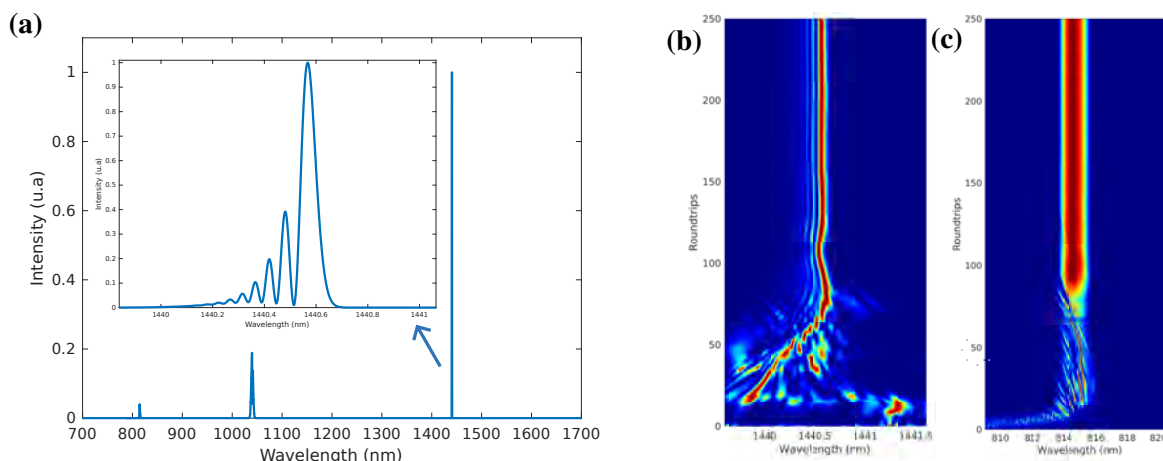


Figure 3: (a) Spectre calculé par l'algorithme pour un idler centré à 1440 nm. Évolution des spectres en sortie de cavité. (b) Idler et (c) Signal.

Une cavité auto-démarrant stable est observée pour le signal, centré à 815 nm pour une énergie de 490 nJ et pour l'idler, centré à 1440 nm pour une énergie de 270 nJ. Les impulsions générées avec des durées similaires de l'ordre de 130 ps. Le signal peut théoriquement être compressé à des durées sub-ps, favorable ainsi pour des applications en microscopie multiphotonique.

#### CONCLUSION

Nous démontrons ici la génération d'impulsions accordables énergétiques par un FOPCPO couvrant des gammes spectrales d'intérêt pour des applications en spectroscopie Raman et microscopie multiphotonique. Les simulations obtenues à 1440 nm démontrent le potentiel de cette plateforme expérimentale pour l'obtention d'impulsions courtes autour de 800 nm pour des applications en microscopie multi-photonique. Les performances complètement potentiellement accessibles à cette nouvelle configuration de FOPCPO seront détaillées lors de la conférence.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Guezennec, T. *et al.*, "Dynamics of a high-energy fiber optical parametric chirped-pulse oscillator", *Opt. Express*, doi: 10.1364/OE.537887.
- [2] Lafargue, L. *et al.*, "All-polarization-maintaining and high-energy fiber optical parametric chirped-pulse amplification system using a solid core photonic hybrid fiber", *Opt. Lett.*, doi: 10.1364/OL.468791.
- [3] Zhou, Y. *et al.*, "A Time-Dispersion-Tuned Picosecond Fiber-Optical Parametric Oscillator", *IEEE Photonics Technology Letters*, doi: 10.1109/LPT.2009.2024642.
- [4] Brinkmann, M. *et al.*, "Optical Parametric Chirped Pulse Oscillation", *Optics Express*, doi: 10.1364/OE.25.012884.