



**HAL**  
open science

# Optimisation des propriétés d'un supercontinuum par apprentissage automatique pour la microscopie multiphotonique

Van Thuy Hoang, Yassin Boussafa, Lynn Sader, Sébastien Février, Vincent Couderc, Benjamin Wetzel

## ► To cite this version:

Van Thuy Hoang, Yassin Boussafa, Lynn Sader, Sébastien Février, Vincent Couderc, et al.. Optimisation des propriétés d'un supercontinuum par apprentissage automatique pour la microscopie multiphotonique. OPTIQUE Nice 2022, Jul 2022, Nice, France. hal-03811797

**HAL Id: hal-03811797**

**<https://hal.science/hal-03811797>**

Submitted on 12 Oct 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# OPTIMISATION DES PROPRIETES D'UN SUPERCONTINUUM PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE POUR LA MICROSCOPIE MULTIPHOTONIQUE

Van Thuy HOANG, Yassin Boussafa, Lynn Sader, Sébastien Février, Vincent Couderc, Benjamin Wetzel\*

Institut de Recherche XLIM, CNRS UMR 7252, Université de Limoges, Limoges 87060, France

\* [benjamin.wetzel@xlim.fr](mailto:benjamin.wetzel@xlim.fr)

## RESUME

Nous étudions des approches innovantes d'apprentissage automatique afin d'optimiser les propriétés spectro-temporelles d'un supercontinuum fibré. Nous démontrons numériquement que l'ajustement d'un motif d'impulsions femtosecondes permet de maximiser le profil temporel à des longueurs d'onde pertinentes en imagerie multiphotonique.

**MOTS-CLES :** *fibre optique; supercontinuum; microscopie multiphotonique; apprentissage automatique*

## I. INTRODUCTION

La microscopie par excitation multiphotonique (EMP) a joué un rôle crucial dans les techniques d'imageries biologiques, car elle permet d'observer les tissus vivants avec une plus grande profondeur de pénétration et une excellente sélectivité. La microscopie EMP s'appuie sur l'absorption multiphotonique (AMP), ceci permet l'utilisation de différentes modalités qui dépendent fortement des propriétés du fluorophore et du laser d'excitation (ex : longueur d'onde, durée d'impulsion, puissance crête). Cependant, avoir une excitation laser polyvalente et adaptable représente un défi : par exemple, la couverture spectrale est limitée par le milieu à gain ou par l'ajustement de la conversion paramétrique mise en œuvre lors de l'émission laser. En guise d'alternative, la génération de supercontinuum (SC) a été implémentée pour l'imagerie multiphotonique car elle permet une excitation large bande englobant plusieurs pics d'AMP et couvrant le spectre d'absorption de différents fluorophores. Elle permet de plus, la mise en place d'une spectroscopie multiplexée sans nécessiter de balayage en longueur d'onde ou de filtrage de la lumière excitatrice [3].

Nous rapportons ici un cas d'utilisation d'apprentissage automatique afin d'optimiser les propriétés spectro-temporelles d'un SC pour améliorer spécifiquement les signaux issus d'EMP compatibles avec une variété de fluorophores et de modalités d'excitation. En particulier, nous explorons numériquement la manière d'utiliser des motifs d'impulsions (femtosecondes) à profils temporels reconfigurables pour contrôler les dynamiques de propagation dans une fibre hautement non linéaire (HNLF) et, consécutivement, les propriétés du SC final [1]. Dans notre cas, cette approche est évaluée numériquement en vue de maximiser l'AMP typique aux longueurs d'onde choisies, et d'une manière adaptée à l'imagerie.

## II. METHODES ET RESULTATS

Dans nos simulations, nous considérons de multiples motifs d'impulsions dont l'adaptation et la mise en forme ont été précédemment rapportées expérimentalement via l'utilisation d'un système de cascade d'interféromètres de Mach-Zehnder (IMZ) sur puce [1,2]. Ce système intégré permet la génération d'un maximum de 256 impulsions, individuellement séparées de 1 ps, comme visible sur la Fig. 1. En particulier, nous étudions le cas d'une impulsion initiale de 100 fs dont le profil en sortie de puce est obtenu en ajustant les rapports de transmission des 8 IMZ avant amplification et injection dans la fibre HNLF [5].

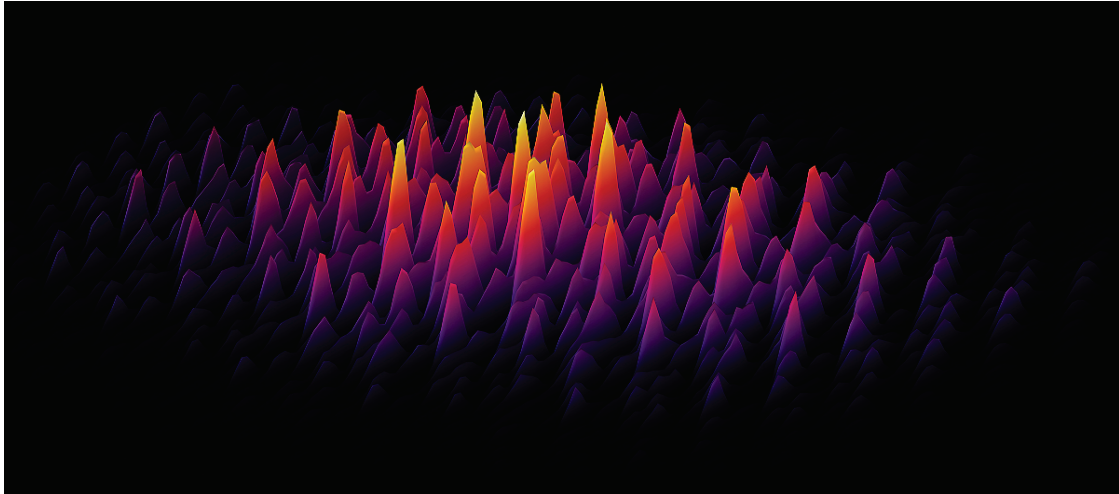


Fig. 1. Trace FROG (*Frequency-Resolved Optical Gating*) d'un motif d'impulsion généré par le système de cascade de IMZ sur puce [1].

Après la propagation dans cette fibre, et l'élargissement spectral du train d'impulsion, le spectre en sortie est filtré aux longueurs d'onde choisies, et un algorithme génétique [1, 6], (*Genetic Algorithm* - GA) est utilisé afin de maximiser le signal d'AMP (1) de manière itérative :

$$I_{2PA} = \int |I_{1133}(t)|^2 dt ; I_{3PA} = \int |I_{1700}(t)|^3 dt \quad (1)$$

Dans cet exemple, nous avons sélectionné deux longueurs d'onde particulières (1133 et 1700 nm) qui peuvent être utilisées pour l'absorption à 2 photons (2PA) et à 3 photons (3PA) d'un fluorophore dont la longueur centrale d'EMP serait à 566 nm [4]. En tirant profit de l'optimisation par apprentissage automatique, nous pouvons explorer l'espace des paramètres et améliorer rapidement le signal d'EMP, comparé à des simulations aléatoires, comme vu sur la Fig. 2(a).

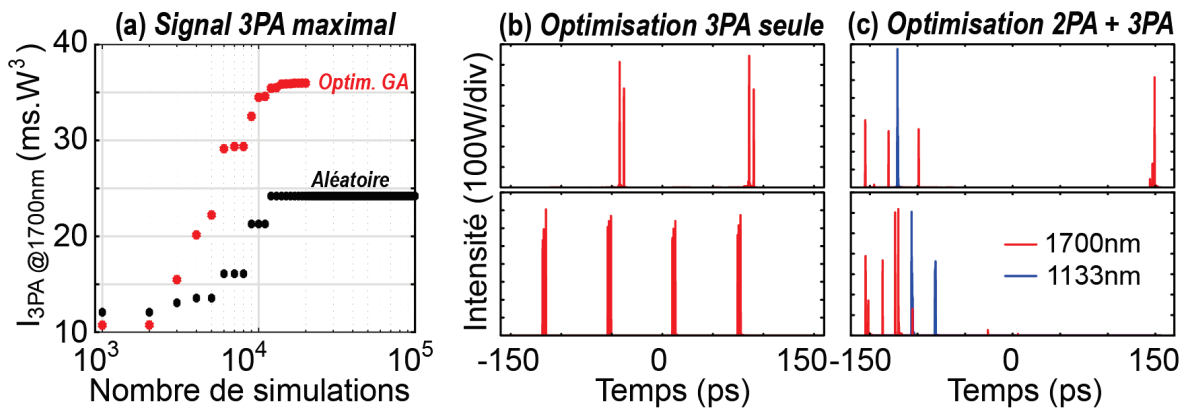


Fig. 2. (a) Evolution du maximum du signal à trois photons à 1700 nm obtenu via des simulations de Monte-Carlo (aléatoires) ou via l'optimisation par GA. Exemples de traces temporelles obtenues après filtrage spectral pour (b) l'optimisation de signal 3PA ou (c) pour l'optimisation conjointe de la 2PA et de la 3PA.

Outre l'optimisation de signaux d'AMP, l'utilisation d'une impulsion reconfigurable permet de conditionner l'élargissement spectral et ainsi d'obtenir un ajustement versatile du profil temporel en sortie de fibre aux longueurs d'onde choisies. Ceci est notamment visible sur la Fig. 2(b) pour un signal de 3PA avec 2 et 4 impulsions successives, ou pour une excitation conjointe de 2PA et de 3PA avec une forme temporelle plus complexe comme le montre la Fig. 2(c). D'autres simulations de SC montrent également la capacité à améliorer le signal d'EMP avec succès pour différentes

combinaisons de fluorophores et/ou de modalités d'excitation. Dans le cadre de cette étude, nous comparons également plusieurs approches d'optimisation par apprentissage automatique (ex : GA, PSO – *Particle Swarm Optimisation*) [1, 2, 6] ainsi que différents régimes d'élargissement spectral (dispersion normale, anormale) [5] et leur impact sur les propriétés du supercontinuum final (cohérence, reconfigurabilité, etc.).

### CONCLUSION

Par cette preuve de principe numérique, nous visons à développer des méthodes innovantes d'imagerie dynamique et reconfigurable garantissant l'efficacité d'optimisations expérimentales pour la microscopie multiphotonique. En particulier, nous anticipons que la versatilité des profils impulsionnels obtenus permettra d'adapter les intensités, les retards relatifs et les recouvrements temporels des signaux de 2PA et de 3PA. Ceci pourrait également mener à de futures améliorations en microscopie en termes de sélectivité spatiale ou spectrale.

### REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par le Conseil Européen de la Recherche (ERC) via le Programme de Recherche et d'Innovation Horizon 2020 GA No. 950618 (Projet STREAMLINE), par l'Agence Nationale de la Recherche ANR (ANR-20-CE30-0004) et par la Région Nouvelle-Aquitaine (Projets SCIR et SPINAL).

### REFERENCES

- [1] B. Wetzel, et al., "Customizing supercontinuum generation via on-chip adaptive temporal pulse-splitting," *Nat. Commun.*, vol. 9, pp. 4884, 2018.
- [2] M. Chemnitz, et al., "Autonomous on-chip interferometry for reconfigurable optical waveform generation," *Optica*, vol. 8, pp. 1268, 2021.
- [3] A. M. Larson, "Multiphoton microscopy," *Nat. Photonics*, vol. 5, pp. 1, 2011.
- [4] D.R. Miller, J. W. Jarrett, A. M. Hassan, and A. K. Dunn, "Deep Tissue Imaging with Multiphoton Fluorescence Microscopy," *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, vol. 4, pp. 32, 2017.
- [5] J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber." *Rev. Mod. Phys.*, vol. 78, pp. 1135, 2006.
- [6] G. Genty, L. Salmela, J. M. Dudley, D. Brunner, A. Kokhanovskiy, S. Kobtsev, and S. K. Turitsyn, "Machine learning and applications in ultrafast photonics." *Nat. Photonics*, vol. 15, pp. 91, 2021.