



HAL
open science

Caractérisation et contrôle intelligent des effets non-linéaires en optique guidée

Lynn Sader, Van-Thuy Hoang, Yassin Boussafa, Bruno P Chaves, Surajit Bose, Anahita Khodadad Kashi, Raktim Haldar, Sébastien Fevrier, Alessandro Tonello, Vincent Kermene, et al.

► To cite this version:

Lynn Sader, Van-Thuy Hoang, Yassin Boussafa, Bruno P Chaves, Surajit Bose, et al.. Caractérisation et contrôle intelligent des effets non-linéaires en optique guidée. Journées Nationales de l'Optique Guidée (JNOG 2023), SFO, Jul 2023, Lyon, France. hal-04308198

HAL Id: hal-04308198

<https://hal.science/hal-04308198>

Submitted on 27 Nov 2023

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.

CARACTÉRISATION ET CONTRÔLE INTELLIGENT DES EFFETS NON-LINÉAIRES EN OPTIQUE GUIDÉE

Lynn SADER¹, Van-Thuy HOANG¹, Yassin BOUSSAFA¹, Bruno P. CHAVES¹, Surajit BOSE^{2,3}, Anahita KHODADAD KASHI^{2,3}, Raktim HALDAR^{2,3}, Sébastien FEVRIER¹, Alessandro TONELLO¹, Vincent KERMENE¹, Vincent COUDERC¹, Brent LITTLE⁴, Sai T. CHU⁵, David J. MOSS⁶, Roberto MORANDOTTI⁷, Michael KUES^{2,3}, Benjamin WETZEL¹

¹ Institut XLIM, CNRS UMR 7252, Université de Limoges, Limoges, France

² Institute of Photonics, Leibniz University Hannover, Hannover, Germany

³ Cluster of Excellence PhoenixD, Leibniz University Hannover, Hannover, Germany

⁴ QXP Technologies Inc., Xi'an, China

⁵ Department of Physics, City University of Hong Kong, Hong Kong, China

⁶ Optical Sciences Centre, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Victoria, Australia

⁷ Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Centre EMT, Varennes, Québec, Canada

benjamin.wetzel@xlim.fr

RESUME

Nous passons en revue nos travaux récents pour la mise en forme du signal optique et sa caractérisation avancée. Nous montrons que des approches d'apprentissage automatique peuvent être exploitées pour contrôler les effets non-linéaires dans des plateformes d'optique guidée et ainsi générer des paquets d'ondes optiques aux propriétés personnalisables.

MOTS-CLEFS : *caractérisation avancée ; photonique ultra-rapide ; optique non-linéaire ; apprentissage automatique.*

1. INTRODUCTION

Récemment, les domaines de la photonique ultrarapide et non linéaire ont connu des avancées notables dont l'apprentissage automatique a été un moteur dans de nombreux efforts de recherche [1]. Ces progrès, au-delà des aspects algorithmiques, reposent notamment sur la mise en œuvre de techniques de caractérisation efficaces couplées à des mécanismes de mise en forme d'impulsions optiques adaptés pour le contrôle des dynamiques non-linéaires en jeu lors de la propagation guidée des impulsions. Nous présentons ici un aperçu de nos résultats récents dans ce domaine à travers deux exemples aux approches expérimentales complémentaires : l'optimisation spectrale de signaux incohérents générés par instabilité de modulation dans les fibres optiques ainsi que le contrôle spectro-temporel de supercontinua cohérents obtenus dans une architecture hybride fibrée et intégrée.

2. OPTIMISATION SPECTRALE DES DYNAMIQUES D'INSTABILITE DE MODULATION

L'instabilité de la modulation (MI) est un processus non-linéaire bien connu en optique guidée. Basée sur le mélange à quatre ondes, la MI se caractérise par l'émergence de nouvelles composantes spectrales, provenant de signaux cohérents (MI induite) ou apparaissant spontanément par amplification du bruit (MI spontanée), impliquant ainsi des processus incohérents et complexes tout en rendant son contrôle expérimental difficile [2].

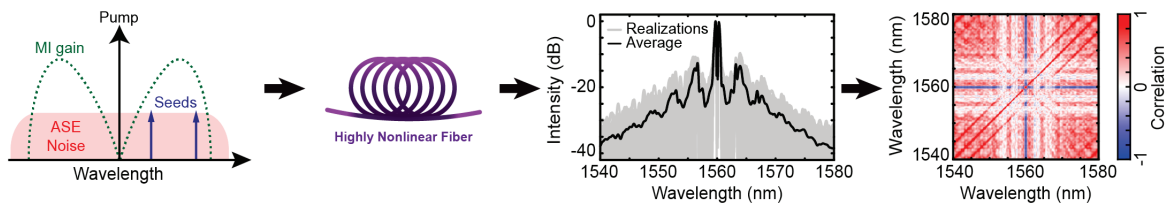


Figure 1 : Schéma illustrant le contrôle des dynamiques d'instabilité de modulation dans une fibre optique. La croissance du bruit initial (MI spontanée) entre en compétition avec des signaux de modulation cohérents (MI induite) avec des faibles amplitudes et des paramètres réglables ($\lambda_1, \lambda_2, \varphi_1, \varphi_2$). L'ajustement de ces signaux initiaux (« seeds » – flèches bleues) permet le contrôle des fluctuations du spectre incohérent de sortie et de leurs corrélations spectrales spécifiques.

Dans ce cadre, nous étudions ici le contrôle de la MI spontanée par ensemencement optique [3,4], en utilisant de faibles signaux cohérents dont les paramètres sont ajustés par des techniques d'optimisation par apprentissage automatique (Figure 1). Pour la caractérisation expérimentale, nous avons mis en œuvre une technique d'étirage temporel dispersif (DFT) permettant la mesure des fluctuations spectrales en temps réel [5]. Dans ce cadre, nous rappellerons les principes de la DFT (Figure 2) et nous présenterons une variation de cette approche basée sur une technique de comptage de photon (PD-DFT) permettant d'atteindre une résolution, une sensibilité et une dynamique accrue comparée aux approches basées sur une photo-détection directe et ultra-rapide (SPD-DFT).

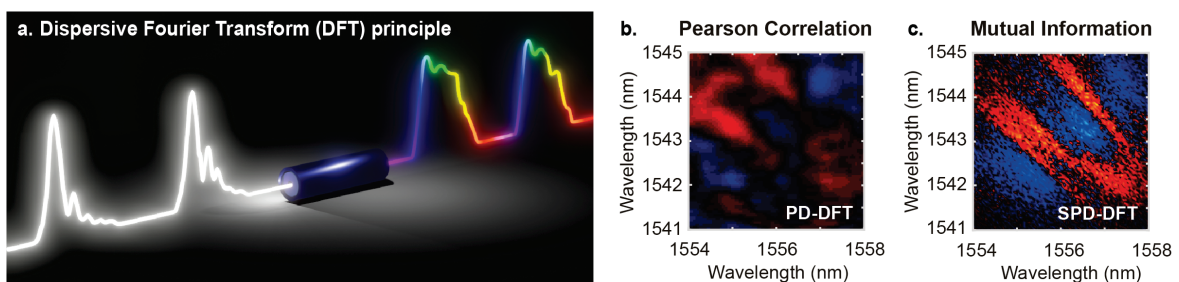


Figure 2 : a. Principe de l'étirage temporel dispersif (DFT) permettant la caractérisation temp-réel des fluctuations spectrales dans le domaine temporel. b. Corrélation spectrale de Pearson mesurée par DFT via un système optoélectronique incluant photodiode et oscilloscope rapide (PD-DFT). c. Information spectrale mutuelle correspondante, mesurée par DFT via un système de comptage de photon (SPD-DFT).

Pour le contrôle visé de la MI, nous montrons que la caractérisation par DFT, couplée à une optimisation par algorithme génétique (GA) pour modifier les paramètres de deux signaux optiques faibles (mais cohérents), permet d'ajuster les dynamiques de conversion de fréquences qui entrent en concurrence avec la MI spontanée provenant de l'amplification du bruit (Figure 3). Ce contrôle entièrement optique de dynamiques non-linéaires incohérentes peut ainsi être utilisé pour ajuster la corrélation entre des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre de sortie (Figure 3b,c).

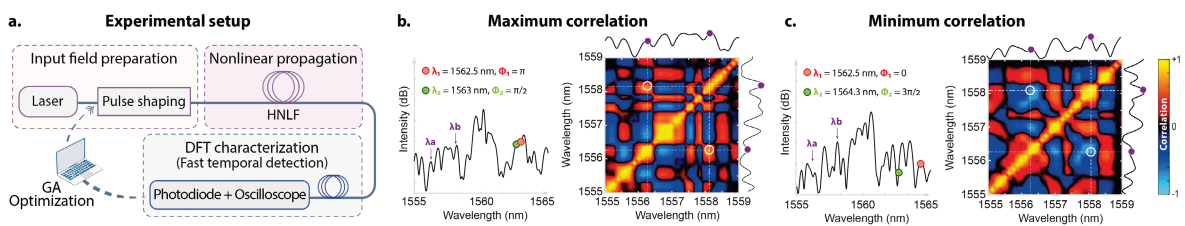


Figure 3 : a. Configuration expérimentale pour l'optimisation spectrale de la MI par algorithme génétique (GA) selon l'approche de la Fig. 1. b. Spectre optimisé par GA (gauche) et carte de corrélation (droite) par l'ajout de signaux initiaux (λ_1, φ_1) et (λ_2, φ_2), obtenus pour une corrélation maximale entre (λ_a, λ_b). d. Mêmes résultats pour une corrélation minimale entre (λ_a, λ_b).

D'autre part, les techniques d'apprentissage par réseau de neurones ont récemment montré leurs potentiels pour la compréhension et l'étude de mécanismes non-linéaires tels que la MI [1,6,7]. Dans une étude numérique, nous montrons que cette approche peut également être étendue à l'étude de mécanismes incohérents : En utilisant un ensemble de données issu de simulations numériques bruitées, des réseaux de neurones de type « feed-forward » (FFNN) peuvent être entraînés pour prédire les paramètres de signaux initiaux à l'entrée de la fibre ou le spectre moyen en sortie de fibre avec une précision supérieure à 98 % (Figure 4).

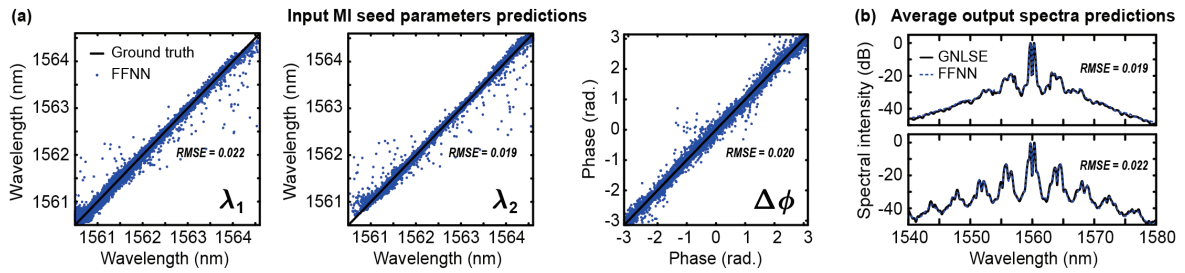


Figure 4 : Etude numérique de la MI basée sur un apprentissage par réseau de neurones (FFNN) pour la prédiction des dynamiques présentés dans la Fig. 1. a. Prédiction des paramètres de signaux initiaux (λ_1 , λ_2 et $\Delta\phi=\phi_1-\phi_2$) des cartes de corrélation spectrales simulées numériquement. (c) Prédiction de spectres de sortie moyens à partir des paramètres de signaux initiaux.

3. OPTIMISATION SPECTRO-TEMPORELLE DES SUPERCONTINUA OPTIQUES

Entre autres, les progrès de la photonique dite "intelligente" ont été rendus possibles par les circuits intégrés photoniques (PIC), qui offrent des fonctionnalités personnalisables et évolutives recherchées pour une grande variété d'architectures d'apprentissage automatique [8]. Par exemple, des architectures relativement simples telles que les lignes à retard programmables (PDL) peuvent être utilisées pour la mise en forme autonome d'impulsions picosecondes [9] ainsi que pour la mise en forme spectrale de supercontinuum (SC) [10]. Des travaux numériques récents ont également démontré le potentiel de ces approches pour accéder à un contrôle spectro-temporel avancé [11] qui profiterait directement à des applications telles que l'imagerie non-linéaire et la microscopie multiphotonique [12]. Nous démontrons ici la caractérisation spectro-temporelle et l'ajustement adaptatif de supercontinua à large bande.

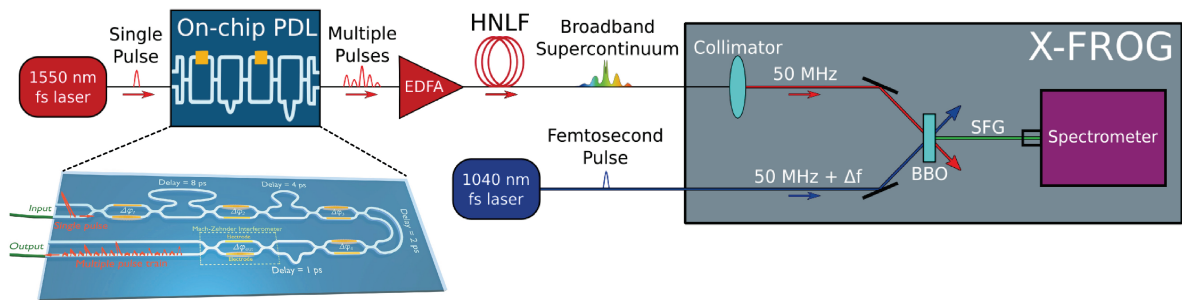


Figure 5 : Schéma expérimental pour la génération et l'optimisation de supercontinuum dans une fibre optique par mise en forme de trains d'impulsions femtosecondes reconfigurables sur puce. La caractérisation spectro-temporelle du supercontinuum est assurée par une corrélation croisée asynchrone et résolue en fréquence (X-FROG) basée sur la génération de somme des fréquences.

Le dispositif expérimental utilisé (Figure 5) comporte un laser femtoseconde injecté dans une puce photonique PDL [9,10] pour générer un motif accordable d'impulsions femtosecondes. Ce train d'impulsions est ensuite amplifié et envoyé dans une fibre hautement non-linéaire (HNLF) pour subir un élargissement spectral. Le supercontinuum en sortie de fibre est caractérisé par une configuration X-FROG asynchrone, produisant un effet de balayage rapide pour l'acquisition des spectrogrammes par échantillonnage optique non-linéaire [13]. Les spectrogrammes expérimentaux (Figure 6) peuvent être obtenus à un taux de rafraîchissement compatible avec les techniques d'optimisation de l'apprentissage automatique. Le contrôle des mécanismes d'élargissement non-linéaires peut alors être adapté de manière efficace en ajustant les motifs d'impulsions d'entrée ("à la volée" et sans déconvolution du spectrogramme).

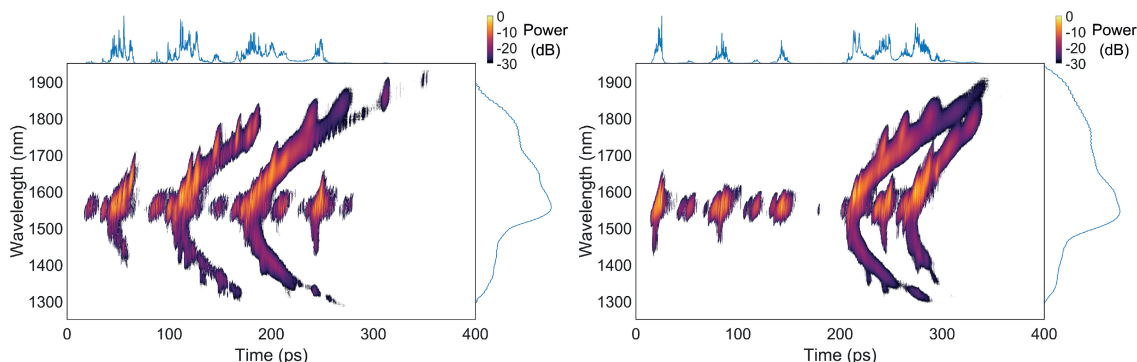


Figure 6 : Spectrogrammes expérimentaux extraits des mesures X-FROG, illustrant la reconfigurabilité spectro-temporelle des supercontinuum générés. Les différents spectrogrammes de sortie sont obtenus en ajustant les motifs d'impulsions à l'entrée de la fibre (via un remodelage temporel par puce photonique).

CONCLUSION

Les techniques présentées ouvrent de nouvelles voies pour l'étude et le contrôle des interactions non-linéaires incohérentes et des dynamiques complexes en optique guidée. Nous anticipons l'extension du contrôle expérimental à des approches d'apprentissage profond, afin de pallier des mesures relativement lentes et complexes, ainsi que la mise en œuvre d'un contrôle spectro-temporel flexible de la lumière, pour des applications spécifiques telles que l'imagerie multiphotonique.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'un financement du Conseil Européen de la Recherche (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union Européenne (GA. 950618 – STREAMLINE ; GA. 947603 – QfreC), de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-20-CE30-0004), de la Région Nouvelle Aquitaine (SCIR ; SPINAL), du Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche (PQuMAL) et de la Fondation Allemande pour la Recherche (DFG) avec le Cluster of Excellence PhoenixD (EXC 2122, ID 390833453).

RÉFÉRENCES

- [1] G. Genty, et al., "Machine learning and applications in ultrafast photonics," *Nat. Photon.* 15, 91 (2021).
- [2] J.M. Dudley, et al. "Instabilities, breathers and rogue waves in optics," *Nat. Photon.* 8, 755 (2014).
- [3] D.M. Nguyen, et al. "Incoherent resonant seeding of modulation instability in optical fiber," *Opt. Lett.* 38, 5338 (2013)
- [4] B. Frisquet, et al. "Collision of Akhmediev Breathers in Nonlinear Fiber Optics," *Phys. Rev. X* 3, 041032 (2013)
- [5] T. Godin et al., "Recent advances on time-stretch dispersive Fourier transform and its applications," *Adv. Phys. X* 7, 2067487 (2022).
- [6] M. Närhi, et al., "Machine learning analysis of extreme events in optical fibre modulation instability," *Nat. Commun.* 9, 4923 (2018).
- [7] A. Sheveleva et al., "Idealized four-wave mixing dynamics in a nonlinear Schrödinger equation fiber system," *Opt. Lett.* 9, 656 (2022).
- [8] W. Bogaerts, et al., "Programmable photonic circuits," *Nature* 586, 207 (2020).
- [9] B. Wetzel, et al., "Customizing supercontinuum generation via on-chip adaptive temporal pulse-splitting," *Nat. Commun.* 9, 4884 (2018).
- [10] B. Fischer, et al., "Autonomous on-chip interferometry for reconfigurable optical waveform generation," *Optica* 8, 1268 (2021).
- [11] V. T. Hoang, Y. Boussafa, L. Sader, S. Février, V. Couderc, B. Wetzel, "Optimizing supercontinuum spectro-temporal properties by leveraging machine learning towards multi-photon microscopy," *Front. Photon.* 3, 940902 (2022).
- [12] E. Hoover & J. Squier, "Advances in multiphoton microscopy technology," *Nat. Photon.* 7, 93 (2013).
- [13] A. M. Weiner, *Ultrafast Optics* (John Wiley & Sons, 2008).