



**HAL**  
open science

## Contrôle de l'instabilité de modulation par injection optique

Lynn Sader, Raktim Haldar, Van Thuy Hoang, Michael Kues, Benjamin  
Wetzel

► **To cite this version:**

Lynn Sader, Raktim Haldar, Van Thuy Hoang, Michael Kues, Benjamin Wetzel. Contrôle de l'instabilité de modulation par injection optique. OPTIQUE Nice 2022, Aug 2022, Nice, France. hal-03811756

**HAL Id: hal-03811756**

**<https://hal.science/hal-03811756>**

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.

# CONTROLE DE L'INSTABILITE DE MODULATION PAR INJECTION OPTIQUE

Lynn Sader<sup>1</sup>, Raktim Haldar<sup>2</sup>, Van Thuy Hoang<sup>1</sup>, Michael Kues<sup>2</sup>, Benjamin Wetzel<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche Xlim, CNRS UMR 7252, Université de Limoges, 87060 Limoges, France

<sup>2</sup> Institute of Photonics, Leibniz University Hannover, Nienburgerstr. 17, Hannover, Germany

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

## RESUME

Nous étudions les dynamiques d'instabilité de modulation d'une impulsion picoseconde lors de sa propagation non-linéaire dans une fibre optique. Nous démontrons la possibilité de contrôler les propriétés de son élargissement spectral selon différents scénarios, en analysant l'impact d'injections optiques adéquatement mises en forme.

**MOTS-CLEFS :** *Optique non-linéaire ; Instabilité de modulation ; Corrélations spectrales.*

## 1. INTRODUCTION

Comprendre les dynamiques de croissance du bruit lors de l'élargissement spectral non-linéaire en optique fibrée est un sujet de recherche actif par son importance dans de nombreuses thématiques fondamentales et la variété de ses applications potentielles [1]. L'instabilité de modulation (*Modulation Instability* - MI) est couramment observée dans la phase initiale de l'élargissement spectral non linéaire des impulsions picosecondes "longues" ou des ondes continues (CW). En optique fibrée, le développement non-linéaire de la MI « induite » a été intensément étudié en considérant une faible modulation de l'onde optique initiale [1]. Inversement, la MI dite « spontanée » se produit à partir de l'amplification du bruit initial, de sorte que des structures localisées apparaissent de manière aléatoire au cours de la propagation. Cependant, l'incapacité à négliger complètement le bruit dans nos systèmes physiques fait que de nombreuses occurrences de ce processus se situent à la frontière entre les régimes de MI induite et spontanée. Le contrôle et la stabilisation de la MI ont déjà été étudiés via plusieurs scénarios de contrôle tout-optique avec divers degrés de succès [2,3].

Ici, nous étudions numériquement et expérimentalement l'impact d'un contrôle de la MI par une méthode d'injection tout-optique en utilisant des signaux de faible intensité et (partiellement) cohérents pour mettre en forme le spectre de la MI. Nous montrons notamment comment l'utilisation de multiples signaux [4] aux caractéristiques judicieusement sélectionnées (en particulier par des approches d'apprentissage automatique) peuvent être exploitées pour ajuster le gain et les propriétés spectrales de la MI.

## 2. MÉTHODES ET RÉSULTATS

Dans notre étude, une impulsion laser sécante hyperbolique de 80 fs centrée autour de 1550 nm avec une puissance de crête de 1 kW (taux de répétition de 50 MHz) est filtrée en une pompe de 30 ps à l'aide d'un filtre spectral programmable (Waveshaper 4000S) capable de fournir un contrôle sélectif de la phase et de l'intensité spectrale (dans ce cas, un filtre gaussien de bande passante 15 GHz). La pompe produite est ensuite amplifiée par un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) et le bruit partiellement rejeté via un filtre passe-bande. Le signal optique ainsi produit est injecté dans une fibre optique hautement non-linéaire (HNL) de 360 m. L'impulsion initiale à large bande peut également être utilisée pour générer des signaux optiques de faible intensité à l'aide du même processus de filtrage spectral (pour générer des impulsions picosecondes cohérentes utilisables pour un contrôle tout-optique). Ces signaux peuvent être combinés avec la pompe et amplifiés en suivant le même chemin optique (cas « cohérent »), ou directement issus d'une autre sortie du Waveshaper avant recombinaison dans la fibre (cas « quasi-cohérent »). En particulier, la longueur d'onde ( $\lambda$  – ici

donnée sous forme de désaccord de fréquence  $\Delta\omega=2\pi\Delta\nu$ , la puissance ( $P$ ), la phase ( $\phi$ ) et la polarisation des signaux par rapport à la pompe optique peuvent être facilement contrôlés afin d'étudier l'impact des paramètres d'entrée sur le processus de la MI [2,3]. Pour pouvoir effectuer des analyses de fluctuations du spectre incohérent obtenu en sortie de fibre HNLf, nous avons mis en œuvre une technique de transformée de Fourier dispersive par étirage temporel (DFT) permettant la mesure en temps réel du spectre dans le domaine temporel (Figure 1).

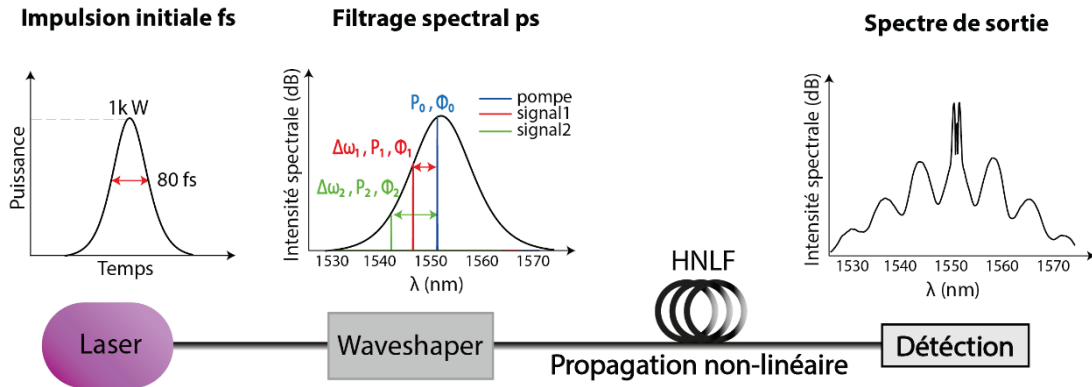


Figure 1 : Montage expérimental utilisé pour extraire et combiner une impulsion de pompe de 30 ps avec deux faibles signaux à partir d'une impulsion initiale de 80 fs. Un filtre spectral programmable est utilisé pour découper spectralement l'impulsion large bande avant amplification et propagation dans une HNLf. Les paramètres initiaux générés (le désaccord en fréquence  $\Delta\omega$ , la puissance  $P$  et la phase  $\Phi$ ) sont ajustés pour étudier leur impact sur la dynamique d'élargissement de la MI.

Cette approche expérimentale permet une analyse statistique détaillée de ces fluctuations spectrales. On peut notamment extraire les cartes de corrélations spectrales afin de mieux comprendre les dynamiques de la MI au cours de la propagation non-linéaire. Les résultats expérimentaux démontrent que les cartes de corrélation spectrale typiquement associées aux dynamiques de la MI [5] peuvent être facilement ajustées par une injection optique contrôlée. Cette méthode permet ainsi d'identifier et de modifier les interactions entre diverses composantes spectrales lors des conversions de fréquences ayant lieu au cours de la propagation (Figure 2).

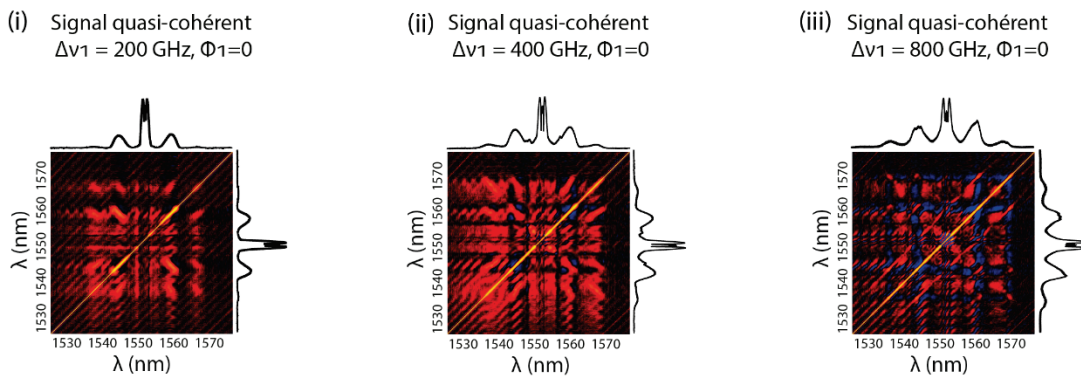


Figure 2 : Exemples de cartes de corrélation spectrale obtenus expérimentalement à la sortie de la fibre pour MI avec une pompe à 1550 nm ainsi qu'un signal quasi-cohérent à (i) 1549 nm (ii) 1547 nm (iii) et 1544 nm.

Dans ce contexte de travail, nous appliquons également des algorithmes génétiques et analysons les résultats issus d'une optimisation des corrélations entre plusieurs longueurs d'ondes du spectre de sortie en ajustant les paramètres d'entrées de la pompe et des signaux injectés.

Cette méthode de contrôle est aussi étudiée par le biais de simulations numériques basée sur l'équation de Schrödinger non linéaire généralisée (GNLSE) [6]. Les résultats numériques, obtenus par des simulations considérant différents bruits aléatoires nous permettent de construire les cartes de

corrélations spectrales ;et illustrent un ajustement possible de la croissance de la MI par diverses méthodes de contrôle tout-optique (Figure 3).

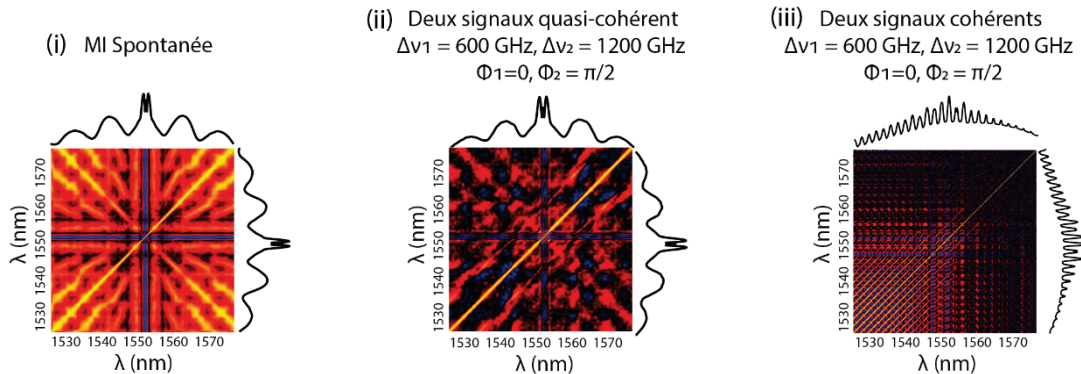


Figure 3 : Exemples de cartes de corrélation spectrale obtenus numériquement à la sortie de la fibre pour la MI spontanée (i) avec une pompe à 1550 nm ainsi que deux signaux quasi-cohérents (ii) et cohérents (iii) à 1545 et 1541 nm.

### CONCLUSION

Nos résultats ouvrent la voie à un contrôle avancé du processus de MI, en tirant parti des accords de phase complexes associées à la cascade du mélange à quatre ondes. Cette approche est également compatible avec une optimisation de ces processus et des interactions non linéaires en optique guidée en s'appuyant sur des algorithmes d'apprentissage automatique [7].

### 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) et No. 947603 (Projet QFreC), par l'Agence Nationale de la Recherche ANR (ANR-20-CE30-0004) par la Région Nouvelle-Aquitaine (Projets SCIR ; SPINAL), par le Ministère Fédéral Allemand de l'Education et de la Recherche, par le programme Quantum Futur (PQuMAL), par la Fondation Allemande pour la Recherche (DFG) et dans le cadre de la stratégie d'excellence allemande au sein du Cluster of Excellence PhoenixD (EXC 2122, ID: 390833453).

### RÉFÉRENCES

- [1] J. M. Dudley, G. Genty, F. Dias, B. Kibler, and N. Akhmediev, "Modulation instability, Akhmediev Breathers and continuous wave supercontinuum generation," *Optics Express*, vol. 17, pp. 21497-21508, 2009.
- [2] D. M. Nguyen, et al. "Incoherent resonant seeding of modulation instability in optical fiber," *Optics Letters*, vol. 38, pp. 5338-5341, 2013.
- [3] A. Bendahmane, J. Fatome, C. Finot, G. Millot, and B. Kibler, "Coherent and incoherent seeding of dissipative modulation instability in a nonlinear fiber ring cavity," *Optics Letters*, vol. 42, pp. 251-254, 2017.
- [4] S. Wabnitz, B. Wetzol. "Instability and noise-induced thermalization of Fermi–Pasta–Ulam recurrence in the nonlinear Schrödinger equation," *Physics Letters A*, vol. 378, pp. 2750-2756, 2014.
- [5] T. Godin, et al. "Real time noise and wavelength correlations in octave-spanning supercontinuum generation," *Optics Express*, vol. 21, pp. 18452-18460, 2013.
- [6] J.M. Dudley, G. Genty et al. "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Review of Modern Physics*, vol. 78, pp. 1135-1184, 2006.
- [7] 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.