



**HAL**  
open science

## **Nouvelle technique ultra-sensible de caractérisation des instabilités non-linéaires par étirage temporel dispersif**

Lynn Sader, Surajit Bose, Anahita Khodadad Kashi, Romain Dauliat,  
Philippe Roy, Marc Fabert, Alessandro Tonello, Vincent Couderc, Michael  
Kues, Benjamin Wetzel

### ► To cite this version:

Lynn Sader, Surajit Bose, Anahita Khodadad Kashi, Romain Dauliat, Philippe Roy, et al.. Nouvelle technique ultra-sensible de caractérisation des instabilités non-linéaires par étirage temporel dispersif. OPTIQUE Nice 2022, Jul 2022, Nice, France. hal-03811779

**HAL Id: hal-03811779**

**<https://hal.science/hal-03811779>**

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.

# NOUVELLE TECHNIQUE ULTRA-SENSIBLE DE CARACTERISATION DES INSTABILITES NON-LINEAIRES PAR ETIRAGE TEMPOREL DISPERSIF

Lynn Sader<sup>1</sup>, Surajit Bose<sup>2</sup>, Anahita Khodadad Kashi<sup>2,3</sup>, Romain Dauliat<sup>1</sup>, Philippe Roy<sup>1</sup>, Marc Fabert<sup>1</sup>, Alessandro Tonello<sup>1</sup>, Vincent Couderc<sup>1</sup>, Michael Kues<sup>2,3</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

<sup>3</sup> Cluster of Excellence PhoenixD, Leibniz University Hannover, Hannover, Germany

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

## RESUME

Nous rapportons une nouvelle technique de caractérisation basée sur la transformée de Fourier par étirage temporel dispersif, utilisant plusieurs détecteurs à photon unique. Nous montrons que cette approche permet l'analyse d'instabilités spectrales avec une haute résolution, une sensibilité élevée, et une plage dynamique théoriquement illimitée.

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

## 1. INTRODUCTION

L'étude des dynamiques instables en optique, telles que l'instabilité de modulation (*Modulation Instability* - MI) se développant à partir du bruit, reste un sujet de grand intérêt en photonique. On retrouve notamment ces dynamiques à la base de nombreux processus d'optique non linéaire, allant du développement des sources photoniques à l'étude de phénomènes complexes tels que la formation des vagues scélérates [1]. Cependant, la capacité d'analyser de telles dynamiques d'une manière appropriée implique d'effectuer des mesures en temps réel d'impulsions optiques ultra-courtes ou de spectres à large bande fluctuants de manière non répétitive. Au fil des ans, diverses techniques de caractérisation optique complémentaires ont été expérimentalement démontrées et affinées, telle que l'approche des lentilles temporelles [2]. Parmi celles-ci, la technique de transformée de Fourier par étirage temporel dispersif (*Dispersive Fourier Transform* - DFT) a été largement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. En effet, cette méthode de « spectroscopie » en temps réel permet de transformer le spectre d'une impulsion optique en une réplique dans le domaine temporel par un effet de dispersion purement linéaire. Cela permet ainsi de récupérer le spectre optique en temps réel, directement à partir du profil d'intensité temporelle [3,4]. En utilisant un photodétecteur ultra-rapide tel qu'une photodiode (PD), on peut facilement capturer les spectres fluctuant au coup par coup (Figure 1) et ainsi en effectuer une analyse statistique détaillée. En particulier, l'analyse de ces fluctuations permet d'extraire des cartes de corrélations spectrales pour remonter aux dynamiques non linéaires sous-jacentes (et identifier par exemple, les interactions entre diverses composantes spectrales - voir Figure 2) [3-5].

Malgré tous ses avantages, la DFT fait face à plusieurs défis techniques : la résolution spectrale équivalente est essentiellement limitée par la bande passante de détection de la photodiode/oscilloscope qui peut atteindre au mieux quelques dizaines de GHz (6 GHz dans notre cas). De plus, les photodiodes rapides présentent généralement une sensibilité limitée (avec une digitalisation typiquement échelonnée sur 8 à 12 bits), et souffrent donc d'une faible dynamique (inférieure à 30 dB). Bien que plusieurs approches aient été démontrées pour contourner ces limitations [6], celles-ci se font généralement au dépend de la résolution ou de la sensibilité de la détection, imposant ainsi un compromis de performance. Pour pallier ces limites, nous proposons ici une variante innovante de cette technique grâce à l'utilisation de plusieurs détecteurs à photons uniques (*Single Photon Detector* - SPD) : combinée à la DFT, une détection via SPD est analogue à

un spectromètre ultra-sensible [7] avec une sensibilité améliorée et une dynamique qui est intrinsèquement illimitée (uniquement liée au temps d'intégration de la détection). L'utilisation de plusieurs SPDs nous permet d'obtenir un accès direct aux dynamiques inter et intra-impulsionnelles en enregistrant successivement le temps d'arrivée des photons (Figure 1).

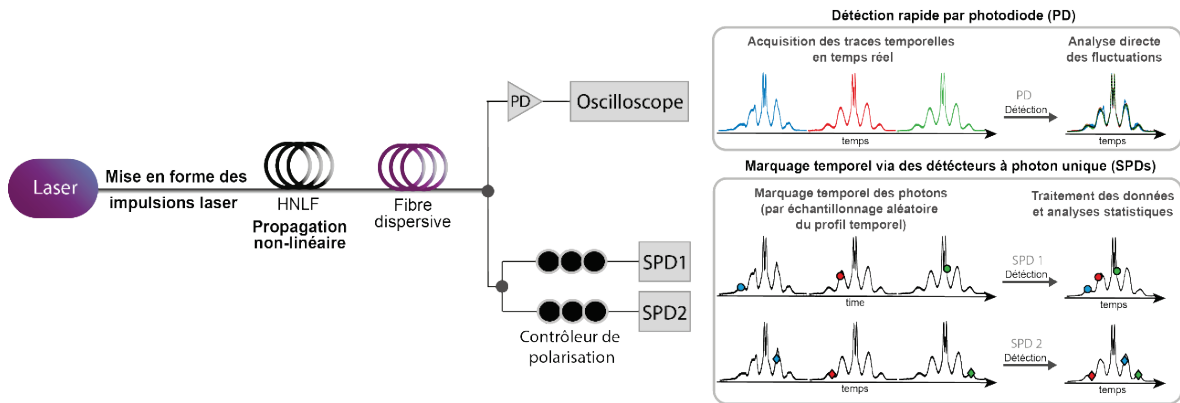


Figure 1 : Montage expérimental pour l'élargissement spectral d'une impulsion par MI. Les dynamiques sont analysées expérimentalement, d'une part à l'aide d'un analyseur de spectre optique (OSA) effectuant un « moyennage » du spectre, et d'autre part via la DFT, permettant une mesure directe, dans le domaine temporel, après propagation dans une fibre dispersive. Les statistiques des fluctuations spectrales de sortie pour chaque mesure peuvent être directement obtenues dans le domaine temporel via une photodiode rapide (PD-DFT), mais peuvent également être extraites à partir de la coïncidence des temps d'arrivée des photons via deux détecteurs à photons uniques (SPD-DFT).

## 2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette nouvelle approche permet d'accéder à des cartes de corrélations spectrales similaires à celles obtenues par DFT « standard » (voir Figure 2) avec une excellente résolution spectrale obtenue grâce à la faible gigue temporelle des SPDs ( $\sim 25$  ps).

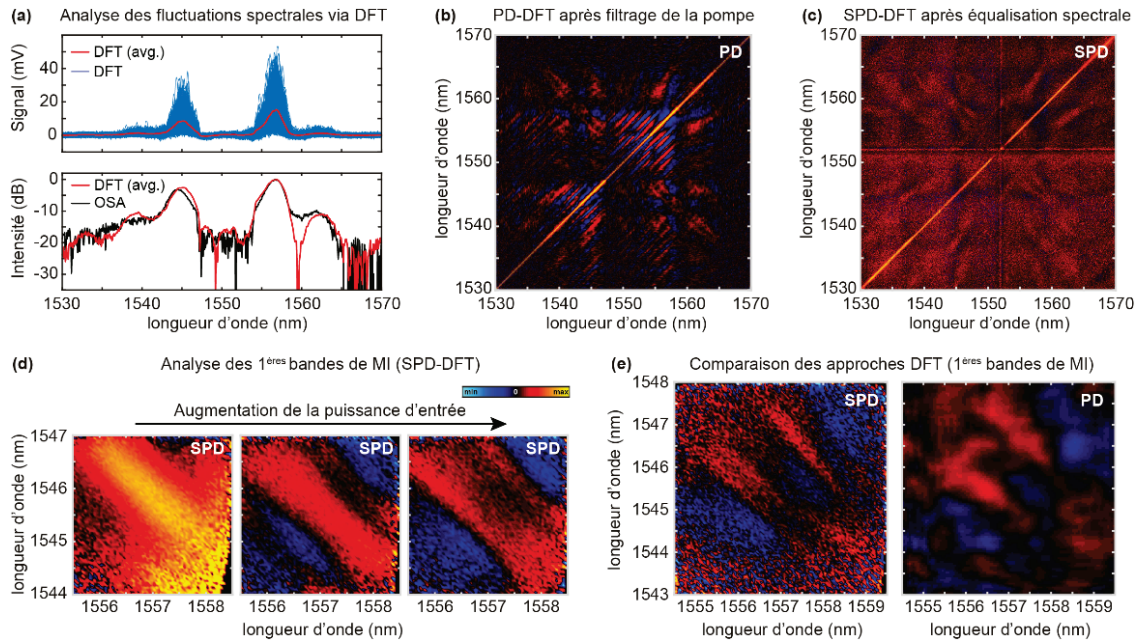


Figure 2 : (a) Fluctuations typiques enregistrées via PD-DFT après filtrage de la pompe et comparaison avec le spectre de l'OSA. (b) Carte de corrélations spectrales correspondantes, extraites via PD-DFT (avec filtrage de la pompe). (c) Carte de corrélations spectrales analogues, extraites via SPD-DFT (sans filtrage de

*pompe mais avec égalisation spectrale). (d) Cartes de corrélations spectrales entre les premières bandes latérales de MI extraites par SPD-DFT en augmentant la puissance de pompe. (e) Comparaison entre les cartes de corrélations respectivement basées sur une détection PD et SPD, obtenues à la puissance maximale de la pompe (premières bandes latérales MI).*

Dans la Figure 2, nous montrons une comparaison entre ces deux techniques de DFT : les fluctuations spectrales typiques d'une mesure à l'autre peuvent être enregistrées via PD-DFT, montrant un bon accord avec les mesures moyennées de l'OSA, mais nécessitant de filtrer la pompe autour de 1550 nm pour pouvoir détecter les bandes latérales de MI avec une dynamique suffisante (Figure 2a). La carte de corrélations spectrales correspondante (Figure 2b) présente des dynamiques de MI typiques, avec des corrélations de bandes latérales bien définies mais une analyse statistique altérée par la réponse impulsionnelle de la PD et limitée pour les bandes d'ordres supérieurs (avec une intensité trop faible pour une détection et une analyse fiable). En revanche, les mesures via SPD fournissent une carte de corrélations bien résolue (Figure 2c) sans réponse impulsionnelle ni limitation forte en terme de sensibilité (mais avec la nécessité d'une égalisation spectrale préalable pour limiter la durée d'acquisition). Même sans cette égalisation, les mesures SPD-DFT des premières bandes latérales symétriques de la MI (à 1545 et 1557 nm, respectivement - voir Figure 2d) sont clairement résolues et montrent l'évolution des caractéristiques de corrélations entre les différentes composantes spectrales lors de l'augmentation de la puissance de la pompe - résultant ici d'un mélange à quatre ondes en cascade [1-5]. Ceci est encore plus clair sur la Figure 2e où, à la puissance de pompe maximale, les deux approches de DFT montrent des signatures qualitativement similaires, mais avec une structure fine visible uniquement sur les mesures via SPD-DFT.

#### CONCLUSION

Nous présentons une approche de SPD-DFT innovante et discutons ses avantages et ses applications potentielles. En particulier, nous constatons qu'une telle technique fournit des mesures de corrélations entre des composantes spectrales de faible intensité (par exemple entre les 3<sup>èmes</sup> bandes latérales de la MI). Nous anticipons que cette approche puisse apporter de nouvelles informations sur des processus induits par le bruit, à la frontière entre l'optique quantique et l'optique non linéaire. Nous prévoyons également la compatibilité de cette technique avec des stratégies d'apprentissage automatique utiles pour le contrôle des interactions non linéaires complexes en optique guidée.

#### 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 QFrC), 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, et al. "Instabilities, breathers and rogue waves in optics," Nat. Photon., vol. 8, pp. 755, 2014.
- [2] M. Närhi, et al. "Real-time measurements of spontaneous breathers and rogue wave events in optical fiber modulation instability," Nat. Commun., vol. 7, pp. 13675, 2016.
- [3] D. Solli, et al. "Fluctuations and correlations in modulation instability," Nat. Photon., vol. 6, pp. 463, 2012.
- [4] B. Wetzal, et al. "Real-time full bandwidth measurement of spectral noise in supercontinuum generation," Sci. Rep., vol. 2, pp. 882, 2012.
- [5] X. Wang, et al. "Correlation between multiple modulation instability side lobes in dispersion oscillating fiber," Opt. Lett., vol. 39, pp. 1881, 2014.
- [6] A. Mahjoubfar, et al. "Time stretch and its applications," Nat. Photon., vol. 11, pp. 341, 2017.
- [7] S.M. Kolenderska, et al. "Quantum-inspired detection for spectral domain optical coherence tomography," Opt. Lett., vol. 45, pp. 344, 2020