

Maîtrise des «vagues optiques extrêmes»

John M. Dudley¹, Goëry Genty², & Benjamin. J. Eggleton³

¹ Institut FEMTO-ST, UMR 6174 CNRS-Université de Franche-Comté, 25030 Besançon, France

² Tampere University of Technology, Institute of Physics, Optics Laboratory, FIN-33101 Tampere, Finland

³ Centre for Ultra-high-Bandwidth Devices & Optical Systems (CUDOS), School of Physics, University of Sydney, NSW 2006, Australia

john.dudley@univ-fcomte.fr

Résumé. Nous étudions les dynamiques d'évolution d'événements optiques de type scélécrats, statistiquement rares et se manifestant par l'apparition de soliton qui ont subi un décalage substantiel vers les grandes longueurs d'onde lors de la génération d'un supercontinuum dans une fibre à cristaux photoniques [D. R. Solli *et al. Nature*, **450**, 1054-1058 (2007)]. Pour cela, on utilise un modèle numérique basé sur l'équation de Schrödinger non linéaire et qui permet d'identifier des moyens pour contrôler l'apparition des vagues extrêmes. En particulier, on montre que l'application d'une modulation de faible intensité sur l'enveloppe de l'impulsion d'entrée de la fibre permet d'accroître d'un facteur dix le nombre de vagues extrêmes apparaissant lors de la génération du supercontinuum.

Abstract. We present a numerical study of the evolution dynamics of "optical rogue waves", statistically-rare extreme red-shifted soliton pulses arising from supercontinuum generation in photonic crystal fiber [D. R. Solli *et al. Nature*, **450**, 1054-1058 (2007)]. Our specific aim is to use nonlinear Schrödinger equation simulations to identify ways in which the rogue wave dynamics can be actively controlled, and we demonstrate that rogue wave generation can be enhanced by an order of magnitude through a small modulation across the input pulse envelope.

1 Introduction

Suite aux expériences réalisées par Ranka *et al.* en 2000 [1] la génération de spectres optiques à bande ultralarge dans les fibres à cristaux photoniques a fait l'objet d'intenses recherches [2]. La teneur en bruit de ces spectres "supercontinuum" a fait l'objet d'une attention particulière. Bien qu'initialement orientées vers la détermination de critères relatifs à la génération de supercontinuum stable par des impulsions femtosecondes, les recherches se sont progressivement étendues à toute la plage des différents régimes, des impulsions picosecondes jusqu'à l'émission continue. Ces études poussées ont alors permis d'établir et d'analyser les différents mécanismes impliqués dans le transfert du bruit initial des impulsions aux supercontinua.

Dans ce contexte, une avancée hautement significative vient d'être rapportée par Solli *et al.* qui sont parvenus à quantifier précisément les fluctuations statistiques d'un supercontinuum généré par des impulsions picosecondes [3]. Même si des études antérieures avaient déjà fait état des variations de la position spectrale des solitons Raman dans des spectres supercontinua, Solli *et al.* ont utilisés une nouvelle technique expérimentale afin de montrer que certaines de ces variations peuvent se traduire par un nombre restreint d'événements que l'on peut qualifier de *scélécrats* par analogie avec le vocabulaire utilisé en hydrodynamique [4]. En effet, ces événements rares sont associés à des solitons possédant une très grande amplitude. De plus, les expériences décrites par Solli *et al.* ayant été réalisées dans un contexte où l'instabilité de modulation joue un rôle crucial pour le développement du supercontinuum, il a été possible d'établir une correspondance entre ces solitons optiques extrêmes et les vagues scélécrates rencontrées en hydrodynamique et dont l'origine est également liée à l'instabilité de modulation [5,6].

Bien qu'une analyse plus poussée serait nécessaire pour établir un lien certain entre les vagues extrêmes du domaine de l'optique et celles du domaine hydrodynamique, notre objectif ici est de prolonger l'étude faite par Solli *et al.* afin d'examiner en détail des possibilités technologiques photoniques qui permettraient de "maîtriser" les "solitons extrêmes" observés dans leurs expériences. Plus précisément, par le biais de simulations numériques basées sur la résolution de l'équation non linéaire de Schrödinger, nous

études les dynamiques d'évolution de ces solitons extrêmes et démontrons qu'il est effectivement possible en pratique et par des techniques photoniques courantes de favoriser leur génération.

2 Simulations

Nos simulations numériques sont basées sur la résolution de l'équation généralisée de Schrödinger, souvent appliquée à la modélisation de la génération de supercontinuum en fibre optique [2]. On peut logiquement penser que la dynamique des vagues scélérates optiques se manifeste dès lors que la génération du supercontinuum est initiée par l'instabilité de modulation. C'est pourquoi nous nous plaçons ici dans le cadre de la propagation d'impulsions picoseconde avec des conditions initiales semblables aux études numériques antérieures et qui sont favorables au développement de l'instabilité de modulation. Plus spécifiquement, nous simulons la propagation d'impulsions à 1060 nm de type gaussien et de durée 5 ps dans une fibre à cristaux photoniques d'une longueur de 20 m. Le minimum de dispersion de la fibre se situe à 1055 nm. Les autres paramètres considérés dans notre modèle numérique sont identiques à ceux de la référence [3]. Nous incluons le bruit de fond quantique dans les simulations en utilisant un modèle "un photon par mode" ainsi que le bruit thermique induit par la diffusion Raman spontanée [7].

Les caractéristiques typiques de l'apparition de solitons extrêmes sont illustrées sur la figure 1 où sont superposés les spectres d'un ensemble de 1000 simulations avec des distributions de bruits originelles différentes (courbes grises) ainsi que la moyenne de ces spectres (courbe noire). Un zoom centré sur les composantes des spectres aux grandes longueurs d'onde permet de clairement visualiser le petit nombre d'événements scélérats associés à un décalage très prononcé des spectres vers les grandes longueurs d'onde. Ces événements extrêmes peuvent être isolés aisément en utilisant la technique développée dans la référence [?]. Spécifiquement, pour chaque supercontinuum de l'ensemble, un filtre sélectionne les composantes spectrales situées au-dessus d'une longueur d'ondes particulière et ces dernières sont ensuite converties en une série d'impulsions temporelles ultra-courtes par transformation de Fourier. La puissance crête de ces impulsions varie selon la position du filtre relativement à la structure spectrale du supercontinuum. La distribution de fréquence de la puissance crête de ces impulsions permet de capturer la présence des vagues scélérates, statistiquement rares, et matérialisée par une puissance crête maximale et un décalage substantiel de leurs spectres vers les grandes longueurs d'onde.

La figure 1c montre l'histogramme calculé à partir des données obtenues par un filtre placé à 1210 nm. La distribution de fréquence penche manifestement vers les impulsions de faible puissance crête et seule une simulation sur les 1000 de l'ensemble fait apparaître un soliton extrême de puissance crête supérieure à 1 kW.

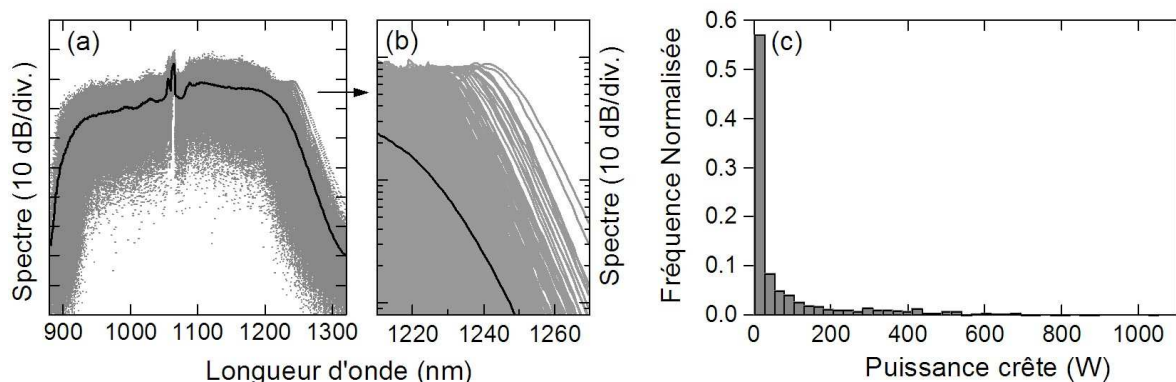
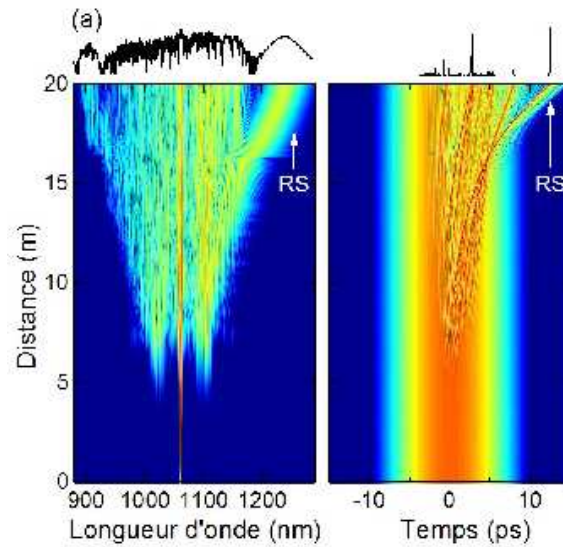
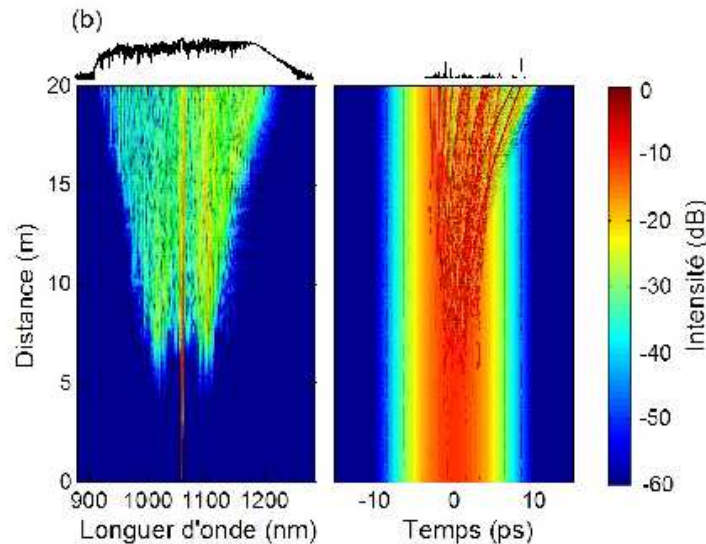


Fig.1. Résultats montrant un ensemble de 1000 spectres (en gris). La moyenne de ces spectres apparaît en noir. (b) Zoom centré sur la partie correspondant aux longueurs d'onde supérieures à 1210 nm. (c) Histogramme de la distribution de fréquence de la puissance de crête.



(a) Cas statistiquement rare avec génération d'un soliton extrême (« rogue soliton » — RS)



(b) Cas proche de la distribution médiane

Fig.2. Graphiques montrant l'évolution spectrale et temporelle.

D'autres éléments clés de la dynamique des solitons extrêmes sont présentés sur la figure 2 où est comparée l'évolution spectrale et temporelle de deux impulsions correspondant à deux réalisations particulières de l'ensemble. Spécifiquement, la figure 2a illustre l'évolution d'un événement de type scélérat avec l'apparition d'un soliton de puissance crête 900 W et une longueur d'onde centrale à 1240 nm alors que la figure 2b illustre un cas où le spectre en sortie de la fibre est principalement confiné aux longueurs d'ondes en dessous de 1210 nm. Sur cette figure, on peut observer la façon dont l'instabilité de modulation se développe à partir du bruit initial et conduit à des variations importantes des trajectoires spectrales et temporelles après une distance de l'ordre de 10 m. C'est précisément durant cette phase initiale lors de laquelle se développe l'instabilité de modulation que l'enveloppe de l'impulsion se scinde en multiples solitons. On voit aussi qu'un événement scélérat est apparemment associé à l'éjection d'un des solitons

en lesquels l'enveloppe principale s'est scindée. Ce soliton se propage à une vitesse différente des autres solitons, subissant ainsi un décalage Raman beaucoup plus important et se détachant clairement des autres composantes du supercontinuum à la fois dans les domaines temporel et spectral.

3 Maîtrise de la dynamique des vagues extrêmes

Dans ce paragraphe, nous examinons comment la dynamique sous-jacente à l'apparition de solitons extrêmes peut être maîtrisée. En particulier, le rôle central joué par l'instabilité de modulation dans le développement du supercontinuum suggère qu'une modification des conditions initiales devrait influencer l'apparition de vagues scélérates. En effet, il a déjà été prouvé à l'aide d'un modèle numérique qu'il existe une corrélation entre l'amplitude d'un soliton extrême et un jet de bruit localisé sur la partie avant de l'impulsion. L'idée ici est de considérer une approche pratique du contrôle des vagues extrêmes en adaptant des techniques qui ont prouvées leur efficacité dans l'étude des phénomènes liés à l'instabilité de modulation induite à des fréquences de l'ordre du THz. La méthode choisie consiste à générer un supercontinuum par un système à double-pompage dont le battement en fréquence induit une modulation à basse amplitude sur toute l'enveloppe temporelle de l'impulsion initiale. Une telle technique peut être aisément mise en oeuvre en pratique en injectant simultanément avec l'impulsion originale une réplique de cette dernière décalée en fréquence au moyen d'une technique classique de conversion de longueur d'onde.

Les résultats numériques de la figure 3 illustrent les effets d'une telle architecture de pompage. Nous choisissons de moduler la pompe principale qui consiste en une impulsion de type gaussien par un signal d'intensité faible (4% de l'intensité de pompe principale) et décalée en fréquence de 5.8 THz. Les résultats obtenus d'un ensemble de 1000 simulations démontrent comment la faible modulation imposée à l'origine permet de stimuler une augmentation substantielle du nombre de vagues extrêmes observées comparé au cas d'une architecture à une seule pompe sans modulation initiale.

Spécifiquement, la figure 3 montre un élargissement du spectre moyen et un nombre de solitons extrêmes accru. Ceci est d'ailleurs confirmé par un examen comparatif des figures 1 et 3 qui montre que l'histogramme généré par un ensemble de 1000 simulations en présence d'une modulation initiale est incliné de manière très significative vers la génération d'événements à large puissance crête. Une analyse quantitative de l'histogramme de la figure 3 montre en particulier une augmentation d'un facteur 10 dans le nombre de vagues extrêmes filtrées au dessus de 1210 nm et possédant une puissance crête supérieure à 1 kW.

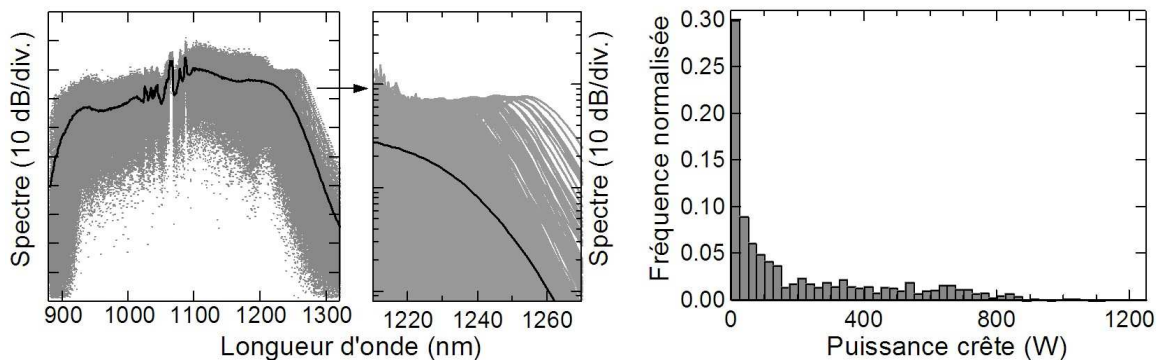


Fig.3. Résultats d'un ensemble de 100 simulations (en gris) avec modulation initiale de 5.8 THz de la pompe principale. La moyenne de ces spectres apparaît en noir. La figure montre également un zoom centré sur la partie correspondant aux longueurs d'onde supérieure à 1210 nm et une histogramme de la distribution de fréquence de la puissance crête.

4 Conclusions

L'étude proposée ici trouve son origine dans la récente observation expérimentale de d'événements scélérats optiques, statistiquement rares et se manifestant par l'apparition de solitons aux grandes longueurs d'onde du spectre d'un supercontinu. Nos simulations numériques ont notamment permis d'éclairer les caractéristiques distinctives de ce type d'événement et nous avons également montré qu'une modulation de faible intensité de fréquence 5.8 THz appliquée sur l'impulsion d'entrée induit un accroissement de la fréquence d'apparition des soliton extrêmes.

Références

1. J. K. RANKA, R. S. WINDELER & A. J. STENTZ, Visible Continuum Generation in Air-Silica Microstructure Optical Fibers with Anomalous Dispersion at 800 nm, *Optics Letters*, **25**(1), 25–27 (2000).
2. J. M. DUDLEY, G. GENTY & S. COEN, Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber, *Reviews in Modern Physics*, **78**, 1135–1184 (2006).
3. D. R. SOLLI, C. ROPERS, P. KOONATH & B. JALALI, Optical rogue waves, *Nature*, **450**, 1054–1058.
4. M. HOPKIN, Sea snapshots will map frequency of freak waves, *Nature*, **430**, 492 (2004).
5. A. I. DYACHENKO & V. E. ZAKHAROV, Modulation instability of Stokes wave implies a freak wave, *JETP Letters*, **81**, 255–259 (2005).
6. M. ONORATO, A. R. OSBORNE, AND M. SERIO, Modulational instability in crossing sea states : A possible mechanism for the formation of freak waves, *Physical Review Letters*, **96**, 014,503 (2006).
7. K. L. CORWIN, N. R. NEWBURY, J. M. DUDLEY, S. COEN, S. A. DIDDAMS, K. WEBER & R. S. WINDELER, Fundamental Noise Limitations to Supercontinuum Generation in Microstructure Fiber, *Physical Review Letters*, **90** (11), 113, 904/1–4 (2003).