CASCADE D'ONDES DISPERSIVES DANS UNE FIBRE A DISPERSION OSCILLANTE

A. Bendahmane^{1,*}, F. Braud¹, M. Conforti¹, B. Barviau², A. Mussot¹ et A. Kudlinski¹

¹ PhLAM, IRCICA, CNRS, Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France ² Affiliation actuelle : CORIA, Université de Rouen, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France

*abdelkrim.bendahmane@phlam.univ-lille1.fr

Résumé

Nous observons et expliquons pour la première fois l'émission d'une cascade d'ondes dispersives à partir d'un soliton dans une fibre à dispersion oscillante. Ce nouveau mécanisme physique est lié au fait que les ondes dispersives restent localisées temporellement grâce à l'évolution longitudinale de la dispersion chromatique, contrairement au cas des fibres uniformes.

MOTS-CLEFS : *Optique guidée non-linéaire ; solitons ; ondes dispersives.*

1. INTRODUCTION

Les solitons temporels sont des états localisés existant grâce la compensation entre la dispersion chromatique et la non-linéarité. Dans les fibres optiques, les solitons fondamentaux, bien que particulièrement robustes aux perturbations, sont déstabilisés en présence de dispersion d'ordre supérieur à 2 [1]. Par exemple, lorsqu'une partie du spectre d'un soliton fondamental recouvre la zone de dispersion normale d'une fibre optique, il émet une onde dispersive (OD) principalement à cause de la déstabilisation causée par dispersion d'ordre trois. La génération de l'OD se fait suivant la relation d'accord de phase suivante [1]:

$$\frac{\beta_2}{2}\Omega^2 + \frac{\beta_3}{6}\Omega^3 = \frac{\gamma P}{2} \tag{1}$$

où β_2 et β_3 désignent les coefficients de dispersion d'ordre 2 et 3, $\Omega = \omega_S - \omega_{OD}$ désigne l'écart en fréquence entre le soliton à ω_S et l'OD à ω_{OD} , *P* est la puissance crête du soliton et γ est le coefficient non-linéaire de la fibre. La relation (1) nous indique que lorsque $\beta_3 > 0$ (resp. < 0), l'OD est générée à une longueur d'onde plus courte (resp. plus grande) que le soliton, mais toujours en région de dispersion normale.

La génération d'ODs à partir de solitons a été largement étudiée dans les fibres uniformes, notamment dans le contexte de la génération du supercontinuum. Elle a aussi été observée dans le cas où un soliton se décalant vers les hautes longueurs d'ondes par auto-décalage Raman atteint le deuxième zéro de dispersion (ZD) de la fibre [2]. Dans ce cas, β_3 étant négatif, l'OD est centrée autour d'une longueur d'onde supérieure à celle du soliton. L'une de ses principales caractéristiques est que, comme son nom l'indique, elle s'étale rapidement dans le domaine temporel à cause de la dispersion normale qu'elle subit [2].

Dans cette communication, nous nous intéressons expérimentalement à la dynamique de la génération d'ODs au voisinage du deuxième ZD d'une fibre à dispersion oscillante. Nous montrons que l'évolution longitudinale de la dispersion chromatique permet une relocalisation temporelle de l'OD, qui génère alors sa propre OD par un mécanisme inédit de cascade. De plus, nous démontrons le fait qu'un soliton unique puisse générer plusieurs ODs dans une fibre à dispersion oscillante, elles-mêmes générant leur propre cascade d'ODs.

2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL

La figure 1(a) (axe de gauche) montre l'évolution du diamètre de fibre mesurée pendant le fibrage en fonction de la longueur. Il s'agit d'une fibre microstructuére air/silice qui a été conçue de telle sorte que le second ZD évolue de 1450 nm pour le diamètre le plus important (courbe bleue sur la figure 1(b)) à 1140 nm pour le plus faible (courbe rouge sur la figure 1(b)). Cette fibre présente

une dispersion anormale autour de 1 μ m, ce qui permet la génération de solitons dans cette région à partir d'un laser femtoseconde. Après les différents éléments optiques nécessaires au contrôle de la puissance et de l'état de polarisation du faisceau laser de pompe, les impulsions ont été caractérisées avec un système FROG. Elles présentent une forme gaussienne et sont centrées autour de 1027 nm, avec une durée à mi-hauteur de 340 fs et un paramètre de chirp de +1.5.

3. Résultats

La figure 1(c) montre l'évolution du spectre en fonction de la longueur, mesurée par une méthode de découpes successives de la fibre, pour une puissance crête de pompe de 75 W. La simulation numérique correspondante, effectuée sans ajustement des paramètres à l'aide de l'équation de Schrödinger non-linéaire généralisée, est montrée sur la figure 1(d).



Fig. 1 : (a) Evolution du diamètre (axe de droite) et du second ZD (axe de gauche) en fonction de la longueur de fibre. (d) Courbes de dispersion chromatique correspondant au diamètre minimal (rouge) et maximal (bleu). (c,d) Evolution longitudinale mesurée (c) et simulée (d) du spectre. Ligne blanche : ZD. Marqueurs noirs et rouges : solution de la relation d'accord de phase (1) soliton/OD (noir) et OD/ODC (rouge).

L'accord entre ces deux cartographies est excellent, et montre la dynamique suivante. Un soliton fondamental est éjecté dès le début de la fibre, suite à la fission de l'impulsion de pompe, et subit un auto-décalage Raman vers les hautes longueurs d'onde. À partir de 7 m, l'auto-décalage de ce soliton augmente fortement en raison de la diminution de la dispersion, et le soliton atteint le deuxième ZD (repéré par la ligne blanche) autour de sa valeur minimale de 1140 nm. Une onde dispersive (notée OD1) est alors émise autour de 1230 nm. Lorsque cette OD, initialement localisée en zone de dispersion normale, traverse le second ZD (à environ 10 m), nous remarquons l'apparition d'une composante spectrale (marquée ODC1) autour de 1340 nm, dont l'origine physique sera discutée à la section suivante. Au même moment, la durée du soliton croît à cause de l'augmentation de la dispersion et le soliton est ainsi comprimé spectralement. Lorsque la dispersion diminue à nouveau (vers 12 m), le soliton se comprime temporellement de sorte que son spectre s'élargit et chevauche à nouveau le deuxième ZD autour de sa valeur minimale à 14.5 m. Une nouvelle onde dispersive (notée OD2) est alors émise autour de 1200 nm. Lorsqu'elle repasse en zone de dispersion anormale (vers 15 m), une nouvelle composante spectrale (notée ODC2) est générée, de la même façon que pour l'OD1. Ces résultats montrent ainsi la possibilité de générer plusieurs ODs (2 dans notre cas) à partir d'un soliton unique, comme prédit numériquement dans la référence [3]. Ils mettent aussi en évidence la génération de deux composantes spectrales (ODC1 et ODC2) dont l'origine physique reste à élucider.

4. DISCUSSION

Afin d'identifier chacune des composantes spectrales observées sur les figures 1(c) et (d), intéressons-nous maintenant au domaine temporel, dont la simulation (correspondant à l'évolution

spectrale de la figure 1(d)) est représentée sur la figure 2(a). Elle montre que les ondes dispersives OD1 et OD2, émises à 9.5 m et 14.5 m, demeurent fortement localisées temporellement au cours de la propagation, contrairement aux ODs observées habituellement dans les fibres uniformes, qui s'étalent très rapidement temporellement à cause de la dispersion normale. La courbe de la figure 2(b), représentant l'évolution de la puissance crête de l'OD1 en fonction de la longueur de fibre, ainsi que les profils temporels de l'OD1 montrés dur la figure 2(c), confirment cette observation. Ces ODs, lorsqu'elles repassent en zone de dispersion anormale, se comportent alors comme des solitons si bien qu'elles génèrent leurs propres ODs (notées ODC1 et ODC2) lorsqu'elles croisent le ZD évoluant le long de la fibre, selon un mécanisme de cascade. Les marqueurs rouges correspondant à l'accord de phase donné par l'Eq. (1), pour OD1 et OD2 remplaçant le soliton, corroborent cette analyse.



Fig. 2 : (a) Simulation dans le domaine temporel. (b) Evolution de la puissance crête de l'OD1 le long de la fibre. (c) Profils temporels de l'OD1. (f,g) Spectrogrammes calculés à 10.6 m pour les profils représentés en (d) : (f) profil noir, (g) profil rouge. (e) Spectres correspondants (calculés à 10.6 m).

Les figures 2(f) et (g) montrent les spectrogrammes calculés à 10.6 m (juste après qu'OD1 ne croise le ZDW) dans la fibre réelle (courbe noire sur la figure 2(d)) et dans une fibre artificielle telle que l'OD1 ne repasse pas en zone de dispersion anormale (courbe rouge sur la figure 2(d)). Dans les deux cas, deux composantes spectrales sont observées de part de d'autre du couple soliton/OD. Elles proviennent d'un mécanisme bien connu de mélange à quatre ondes (FWM) entre le soliton et l'OD [4, 5]. Cependant, la radiation localisée autour de 1340 nm est beaucoup plus intense (99% en énergie) dans la fibre réelle que dans la fibre artificielle, comme le montrent les spectres de la figure 2(e). Ceci est dû au fait que l'OD1 croise le ZD dans le premier cas (courbes noires), ce qui entraîne la cascade d'OD, alors que ce phénomène ne se produit pas dans le deuxième cas (courbes rouges).

CONCLUSION

Ces résultats expérimentaux, analysés à l'aide de simulations numériques réalistes en excellent accord, mettent en évidence un nouveau mécanisme physique de cascade d'ODs à partir d'un soliton. Ce processus est intimement lié au fait que les ODs restent localisées temporellement grâce au fait que la dispersion chromatique de la fibre évolue axialement. D'autres régimes, illustrant notamment la génération d'un continuum d'ODs, seront présentés lors de la conférence.

Références

- [1] N. Akhmediev and M. Karlsson, Phys. Rev. A 51, 2602–2607 (1995).
- [2] D. V. Skryabin, F. Luan, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, Science 301, 1705–1708 (2003).
- [3] F. R. Arteaga-Sierra, C. Milián, I. Torres-Gómez, M. Torres-Cisneros, A. Ferrando, and A. Dávila, Opt. Express 22, 2451–2458 (2014).
- [4] A. V. Yulin, D. V. Skryabin, and P. St. J. Russell, Opt. Lett. 29, 2411–2413 (2004).
- [5] D. V. Skryabin and A. V. Yulin, Phys. Rev. E 72, 016619 (2005).