

INSTABILITE MODULATIONNELLE DANS UNE FIBRE OPTIQUE PRESENTANT UN PROFIL DE DISPERSION OSCILLANT COMPLEXE

François Copie, Alexandre Kudlinski, Matteo Conforti, Gilbert Martinelli, et Arnaud Mussot

Laboratoire PhLAM/IRCICA, Université Lille1, CNRS UMR8523/USR3380, 59658 Villeneuve d'Ascq, France

francois.copie@etudiant.univ-lille1.fr

RÉSUMÉ

L'instabilité modulationnelle dans une fibre optique présentant un profil de dispersion oscillant sinusoïdal est caractérisé par de nombreux lobes dont la position dépend de la fréquence de modulation. Nous proposons d'étudier un profil de modulation de dispersion plus complexe, de type modulation d'amplitude, où deux fréquences au rapport non commensurable permettent de le caractériser. Des travaux analytiques nous permettant de développer une relation de quasi-accord de phase prédisant la position de ces lobes d'instabilité de modulation sont présentés. Ils sont validés par des simulations numériques et par une étude expérimentale.

MOTS-CLEFS : *instabilité modulationnelle ; dispersion périodique ; quasi-accord de phase.*

1. INTRODUCTION

Le processus d'instabilité de modulation résulte de l'amplification d'une faible perturbation par une onde plus puissante lorsque les effets non-linéaires sont compensés par les effets linéaires. Cela se traduit par l'apparition et la croissance de deux lobes spectraux symétriques situés de part et d'autre de la pompe. De nombreux travaux ont été réalisés dans les fibres optiques uniformes depuis sa première observation expérimentale au début des années 80 [1]. Plus récemment, les progrès techniques associés à la fabrication de fibres optiques ont permis de fabriquer des fibres dont les propriétés opto-géométriques varient périodiquement suivant l'axe de propagation [2–6]. Dans cette nouvelle famille de guides d'ondes, la dynamique du processus d'instabilité de modulation est enrichie. On montre qu'en théorie une multitude de lobes d'instabilité est susceptible d'apparaître et que leur position dépend notamment de la période de modulation longitudinale de la fibre optique [7]. Il a par exemple été rapporté expérimentalement que dans une Fibre Optique Microstructurée (FOM) possédant une modulation sinusoïdale de sa dispersion de vitesse de groupe (GVD), plus de 10 lobes pouvaient être déstabilisés [2]. Jusqu'à présent, la totalité des travaux ont été réalisés dans des fibres optiques possédant un format de modulation simple, c'est-à-dire faisant apparaître une seule fréquence de modulation et/ou ses harmoniques [2,7,8]. Nous proposons ici d'étudier l'instabilité de modulation dans une FOM présentant un format de modulation plus complexe dont la décomposition spectrale fait intervenir des fréquences au rapport non commensurable. Dans cette catégorie, nous avons choisi d'étudier un format bien connu, la modulation d'amplitude. Nous présentons une étude analytique qui nous a permis d'établir une relation de quasi-accord de phase non intuitive permettant de prédire la position des lobes d'instabilité de modulation. Nous avons ensuite effectué des simulations numériques qui valident cette étude numérique et finalement des travaux expérimentaux en bon accord avec ces études théoriques.

2. MODÈLE ANALYTIQUE

Notre étude analytique est basée sur le modèle d'équations couplées standard à 4 ondes. Ces équations différentielles permettent de rendre compte du processus d'instabilité de modulation dans

une fibre optique avec des variations longitudinales de ses paramètres [3]. Afin de trouver une solution analytique à ce système d'équations, nous avons supposé (i) que la puissance de *pompe* est constante sur la longueur de fibre, (ii) que la puissance de *pompe* (P_0) est nettement supérieure à celle du *signal* (P_s) et de *idler* (P_l), (iii) que les pertes sont négligeables et (iv) que l'évolution du désaccord de phase non-linéaire est faible devant celle du désaccord de phase linéaire. Nous avons utilisé une FOM dont l'évolution de la dispersion de la vitesse de groupe selon l'axe de propagation est régie par la relation suivante : $\beta_2(z) = \bar{\beta}_2 + \beta_2^A \sin(2\pi z/Z_1) \times \cos(2\pi z/Z_2)$, avec $\bar{\beta}_2$ la GVD moyenne, β_2^A l'amplitude de la variation et $Z_{1,2}$ les périodes de l'enveloppe et de la porteuse. Son évolution est représentée sur la Fig. 1(a). En tenant compte de ces approximations réalistes, nous avons obtenu l'expression du gain paramétrique (non donné ici par simplicité) et l'expression de la position des lobes d'instabilité de modulation :

$$\Omega'_{kk} = \sqrt{\frac{2\pi \left(k \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 Z_2} + k' \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 Z_2} \right) - 2\gamma P_0}{\bar{\beta}_2}} \quad (1)$$

avec k et k' des entiers naturels. On constate que cette expression est relativement complexe en comparaison avec celle correspondant au cas d'une modulation simple. Ainsi, pour chaque couple d'entiers naturels k et k' , une relation de quasi-accord de phase est vérifiée et un lobe d'instabilité de modulation est généré. C'est ce que nous avons illustré sur la Fig. 1(b) où le spectre de gain d'instabilité de modulation est représenté, soit à partir de simulations numériques en intégrant l'équation de Schrödinger non-linéaire (NLSE, trait continu bleu) soit à partir de nos travaux analytiques (cercles rouges).

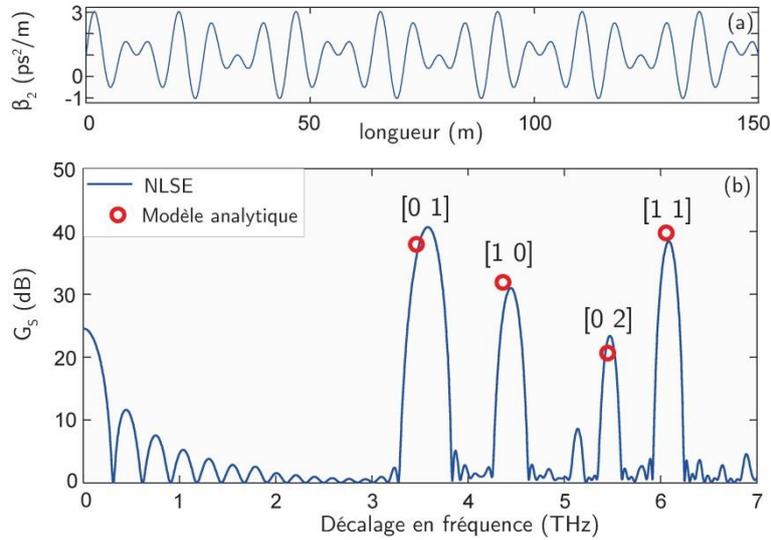


Figure 1 : (a) Evolution longitudinale de la GVD. (b) Spectre de gain d'instabilité de modulation correspondant. Trait continu pour une simulation numérique de l'équation de Schrödinger non-linéaire et cercles rouges, étude théorique. $Z_1 = 7,5 \text{ m}$, $Z_2 = 45 \text{ m}$, $\gamma = 7,5 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, $P_0 = 15 \text{ W}$, $\bar{\beta}_2 = 1 \text{ ps/km}$ et $\beta_2^A = 2,1 \text{ ps/km}$.

On constate que nous obtenons un excellent accord simulations numériques/calculs analytiques ce qui valide notre étude analytique.

3. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Nous avons fabriqué une fibre optique possédant les variations de dispersion représentées sur la Fig. 1(a) et une fibre possédant une modulation sinusoïdale de période 7,5 m (période de la porteuse), qui nous servira d'élément de référence pour mieux mettre en avant le rôle joué par l'ajout d'une nouvelle fréquence de modulation. Le rapport d/Λ (égal à 0,4) est conservé constant sur toute la longueur de fibre et le diamètre varie entre 125 μm et 145 μm . Nous avons utilisé le même montage expérimental que celui décrit dans la Ref. [2]. Le spectre de sortie de la fibre sinusoïdale de base est représenté en bleu sur la Fig. 2. Plusieurs lobes d'instabilité de modulation sont générés et leur position est en bon accord avec la relation de quasi-accord de phase classique [2] (flèches bleues).

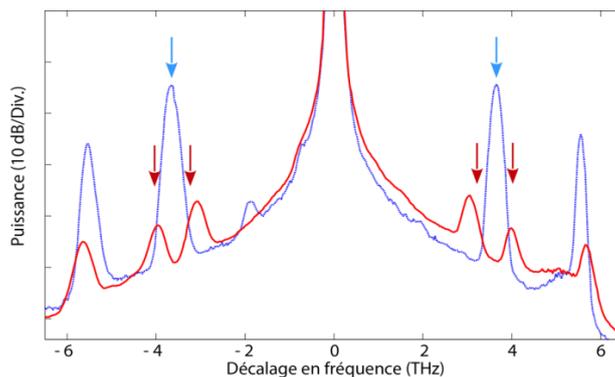


Figure 2 : Spectres de sortie d'une FOM possédant une modulation sinusoïdale simple ($Z=7,5$ m, courbe bleue) et une modulation d'amplitude (courbe rouge). Les flèches renseignent les positions données par les relations de quasi-accord de phase théorique.

En trait rouge, nous avons superposé le spectre de sortie dans la fibre possédant une modulation d'amplitude (Fig. 1(a)). On constate que d'autres lobes d'instabilité de modulation sont déstabilisés, en bon accord avec nos prédictions théoriques matérialisées par les flèches rouges.

CONCLUSION

Nous avons étudié le processus d'instabilité dans une fibre possédant une modulation longitudinale « complexe » de sa dispersion de vitesse de groupe. Nous montrons que l'ajout d'une autre fréquence de modulation induit une modification du spectre d'instabilité de modulation non trivial et inattendue. Nous avons développé une étude théorique qui permet de prédire le gain et la position de ces lobes qui a été confirmée par des études numériques et expérimentales. Lors de la conférence, nous présenterons une étude plus générale montrant l'impact du rapport entre les deux fréquences de modulation Z_1/Z_2 sur le spectre d'instabilité de modulation.

RÉFÉRENCES

1. K. Tai, A. Hasegawa, and A. Tomita, "Observation of modulational instability in optical fibers," *Phys. Rev. Lett.* **56**, 135 (1986).
2. M. Droques, A. Kudlinski, G. Bouwmans, G. Martinelli, and A. Mussot, "Experimental demonstration of modulation instability in an optical fiber with a periodic dispersion landscape," *Opt. Lett.* **37**, 4832–4834 (2012).
3. M. Droques, A. Kudlinski, G. Bouwmans, G. Martinelli, and A. Mussot, "Dynamics of the modulation instability spectrum in optical fibers with oscillating dispersion," *Phys. Rev. A* **87**, 013813 (2013).
4. M. Droques, A. Kudlinski, G. Bouwmans, G. Martinelli, A. Mussot, A. Armaroli, and F. Biancalana, "Fourth-order dispersion mediated modulation instability in dispersion oscillating fibers," *Opt. Lett.* **38**, 3464–3467 (2013).
5. C. Finot, J. Fatome, A. Sysoliatin, A. Kosolapov, and S. Wabnitz, "Competing four-wave mixing processes in dispersion oscillating telecom fiber," *Opt. Lett.* **38**, 5361–5364 (2013).
6. X. Wang, D. Bigourd, A. Kudlinski, K. K. Y. Wong, M. Douay, L. Bigot, A. Lerouge, Y. Quiquempois, and A. Mussot, "Correlation between multiple modulation instability side lobes in dispersion oscillating fiber," *Opt. Lett.* **39**, 1881–1884 (2014).
7. F. Matera, A. Mecozzi, M. Romagnoli, and M. Settembre, "Sideband instability induced by periodic power variation in long-distance fiber links," *Opt. Lett.* **18**, 1499–1501 (1993).