INSTABILITE DE MODULATION VECTORIELLE DE TYPE MANAKOV DANS UNE FIBRE OPTIQUE A DISPERSION NORMALE

B. Frisquet[1,*], B. Kibler[1], P. Morin[1], J. Fatome[1], F. Baronio[2], M. Conforti[3], G. Millot[1], S. Wabnitz[2]

[1]*Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UMR 6303 CNRS/Université de Bourgogne, Dijon, France*
[2]*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Brescia, Italy*
[3]*PhLAM/IRCICA UMR 8523/USR 3380, CNRS-Université Lille 1, Villeuneuve d'Ascq, France*

* benoit.frisquet@u-bourgogne.fr

RESUME

Nous présentons la première observation expérimentale de l'instabilité de modulation vectorielle dans le régime de dispersion normale d'une fibre optique standard, à faible biréfringence aléatoire, équivalente à un système de type Manakov. L'instabilité est induite par deux ondes continues de polarisation orthogonale et multiplexées en longueurs d'onde.

MOTS-CLEFS : *optique non-linéaire ; instabilité de modulation*

1. INTRODUCTION

L'instabilité de modulation (MI) d'un laser continu intense dans une fibre optique est à l'origine des effets fondamentaux tels que les solitons optiques et la génération d'ondes scélérates. La MI (scalaire) se produit dans le régime de dispersion anormale des fibres optiques standards, alors qu'elle doit être également observable dans un régime de dispersion normale à travers la modulation de phase croisée (XPM) entre deux ondes de fréquence différente [1]. Cependant, la MI induite par XPM dans le régime à dispersion normale n'a pas été observé expérimentalement à cause de la compétition avec le mélange à quatre ondes (FWM). Notons que la MI vectorielle (PMI) induite par XPM a été observé avec des pompes polarisées orthogonalement en utilisant de courts segments de fibre optique à haute biréfringence [2-4].

Ici, nous présentons une première démonstration expérimentale de la PMI dans un régime de dispersion normale dans une fibre optique standard à faible biréfringence aléatoire, et de grande longueur (plusieurs km), ce type de système optique est généralement décrit par le modèle de Manakov.

2. THEORIE

Pour une dispersion modale de polarisation (PMD) relativement faible, la propagation de deux ondes orthogonales, u et v, dans une fibre à biréfringence aléatoire peut être décrite par un système de deux équations de Schrödinger non-linéaires couplées (CNLSE) suivant, également appelé système Manakov [5,6]:

$$i\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}} \pm \frac{1}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (|u|^2 + |v|^2)u = 0$$
$$i\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{z}} \pm \frac{1}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + (|v|^2 + |u|^2)v = 0 \qquad (1)$$

où les signes ± se rapportent respectivement aux cas de dispersion anormale ou normale. Dans le régime de dispersion normale, en présence de deux pompes continues polarisées orthogonalement avec des paramètres normalisés tel que l'écart de fréquence 2Δ et une puissance égale à P, le gain de la MI se produit pour des bandes latérales ayant un décalage de fréquence par rapport à chaque pompe égal à Ω, où :

$$max\{4(\Delta^2 - 2P), 0\} < \Omega^2 < 4\Delta^2 \qquad (2)$$

En termes d'unités réelles, la Figure 1(a) illustre le gain de la PMI en fonction de la puissance P_0, avec deux ondes polarisées orthogonalement espacées de 196,1 GHz, dans le cas d'une fibre optique présentant une dispersion D = -14 ps/nm/km à 1555 nm et un coefficient non-linéaire □ = 2,4 $W^{-1}.km^{-1}$.

3. EXPERIENCE

Le montage expérimental utilisé pour démontrer la MI dans le régime de dispersion normal d'un système optique de type Manakov implique deux diodes lasers continues accordables avec des états de polarisation orthogonaux, qui ont été couplées après avoir été amplifiées par deux amplificateurs Erbium (EDFA), puis ensuite injectées dans 5 km d'une fibre optique standard de type Truewave HD. Cette fibre présente les paramètres de dispersion et de non-linéarité décrits ci-dessus ainsi qu'une très faible dispersion modale de polarisation.

Une évaluation quantitative de l'accord entre la théorie et les expériences est fournie par la figure 1(b), où nous comparons la croissance du gain cumulé de la PMI en fonction de la puissance totale des pompes ($2P_0$), pour les deux bandes latérales primaire et secondaire, telle que prédite par les CNLSEs (courbes en trait plein) avec celle obtenue expérimentalement (cercles avec barre d'erreur). Nous montrons également le gain analytique de la PMI obtenu à partir de l'analyse de stabilité linéaire du système Manakov (étoiles). Les gains numérique et expérimental sont inférieurs à la prévision analytique, en raison de la saturation non-linéaire de la MI pour des puissances supérieures à 1.75 W due au mélange quatre-ondes des pompes avec les bandes latérales.

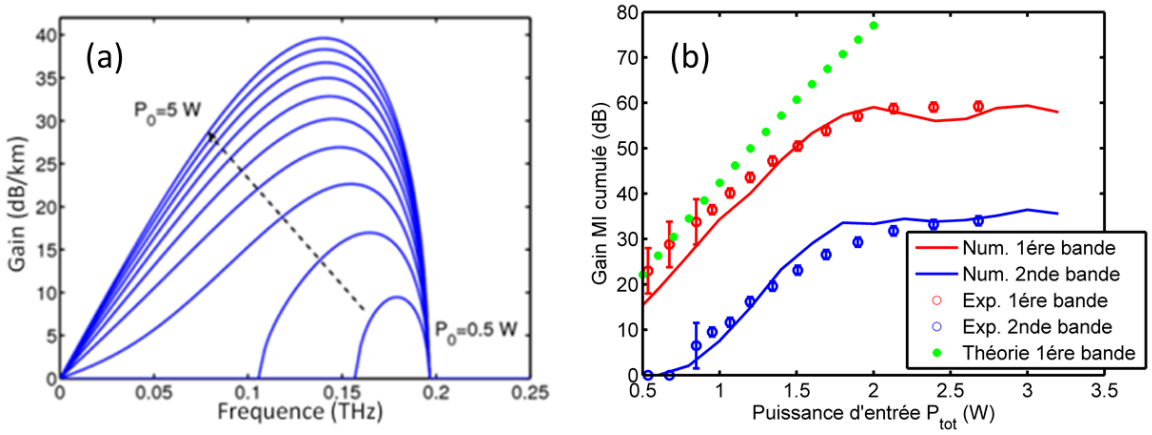

Figure 1 : (a) Spectres de gain MI prédits par l'analyse de stabilité linéaire pour différentes puissances d'entrée des pompes. (b) Comparaison théorie/simulations/expériences de la dépendance du gain cumulé de MI par rapport à la puissance totale d'entrée.

La figure 2(a) compare les spectres en sortie de fibre obtenus par simulation (colonne de gauche) et les mesurés expérimentaux (colonne de droite) issus des deux états de polarisation orthogonaux (u et v) de la fibre, en fonction de la puissance P_0 des deux pompes d'entrée. Ici, l'écart de fréquence entre les deux pompes a été réglé à 200 GHz. Comme nous pouvons le voir, pour des puissances de pompage au-dessus de P_0 = 0,5 W, de larges bandes de gain de MI se développent comme un miroir et polarisées orthogonalement. Nous révélons un excellent accord entre les solutions numériques du système de CNLSEs (Manakov) et les résultats expérimentaux. En outre, nous montrons également l'émergence de bandes latérales extérieures secondaires, résultant du FWM en cascade entre chaque pompe et la bande latérale de MI parallèle. Enfin, nous avons étudié la dépendance du gain MI par rapport à l'espacement de fréquence entre les deux pompes (voir figure 2(b)). Les spectres de sortie obtenus par simulation (colonne de gauche) sont comparés aux spectres expérimentaux (colonne de droite) pour les deux polarisations orthogonales. L'espacement des pompes varient de 100 à 500 GHz pour une puissance de pompe fixée à 0,84W

sur chaque axe de la fibre. La figure 2(b) confirme de nouveau l'excellent accord quantitatif entre le modèle Manakov et les expériences.

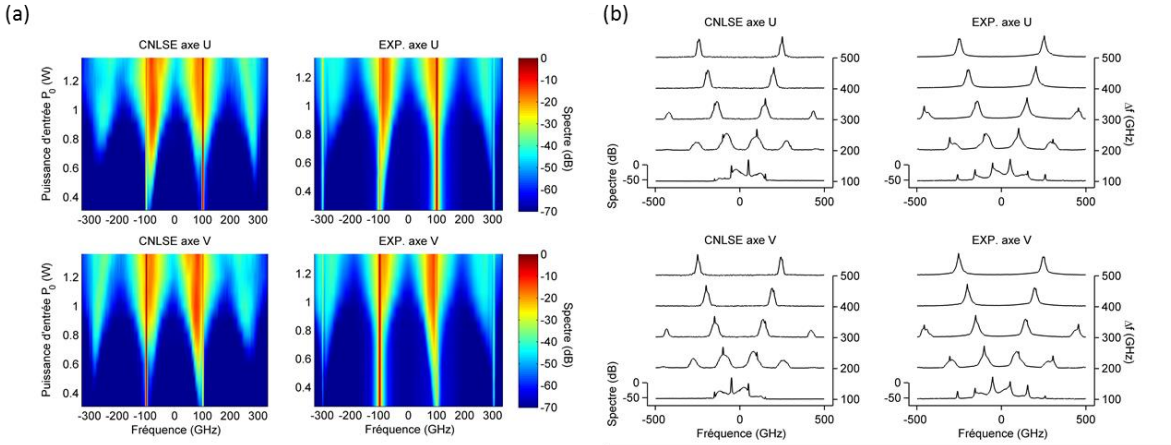

Figure 2 : (a) Comparaison simulations (CNLSEs) / expériences de l'évolution du spectre de sortie selon deux polarisations orthogonales en fonction de la puissance d'entrée des pompes. (b) Même comparaison en fonction de l'espacement entre les deux pompes.

4. CONCLUSION

Nous avons démontré la génération de bandes latérales de type PMI dans le régime de dispersion normale dans une fibre optique standard (plusieurs km) à faible PMD. Nos études approfondies en fonction de la puissance de la pompe et de la dépendance de l'espacement entre les deux pompes pour le gain de MI montrent un excellent accord quantitatif avec les solutions d'un système Manakov. Ces résultats peuvent avoir des applications importantes dans les systèmes de communication par fibres optiques, les dispositifs de traitement de signal optique et les lasers.

5. REFERENCES

[1] G. P. Agrawal, "Modulation instability induced by cross-phase modulation," Phys. Rev. Lett., **59**, 880-883 (1987).

[2] J. E. Rothenberg, "Modulational instability for normal dispersion," Phys. Rev. A, **42**, 682-685 (1990).

[3] F P. Drummond et al., "Cross-phase modulational instability in high-birefringence fibers," Opt. Communications, **78**, 137-142 (1990).

[4] E. Seve et al, "Modulational instability and critical regime in a highly birefringent fiber," Phys. Rev. A, **54**, 3519-3534 (1996)

[5] S. V. Manakov, "On the theory of two-dimensional stationary self-focusing of electromagnetic waves," Sov. Phys. JETP, **38**, 248-253 (1974).

[6] P. K. A. Wai and C. R. Menyuk, "Polarization mode dispersion, decorrelation, and diffusion in optical fibers with randomly varying birefringence," JLT **14**, 148-157 (1996).