

# ETUDE SPECTRO-SPATIALE DES INSTABILITES GEOMETRIQUES PARAMETRIQUES

**Yann Leventoux<sup>1</sup>, Geoffroy Granger<sup>1</sup>, Katarzyna Krupa<sup>2</sup>, Alessandro Tonello<sup>1</sup>, Guy Millot<sup>2</sup>,  
Sébastien Février<sup>1</sup>, Stefano Wabnitz<sup>3</sup>, Vincent Couderc<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institut Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 87 060 Limoges, France*

<sup>2</sup> *Université de Bourgogne Franche-Comté, ICB, UMR CNRS 6303, 9 av. A.Savary, 21078 Dijon, France*

<sup>3</sup> *DIET, Sapienza Università di Roma, via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italy*

[yann.leventoux@unilim.fr](mailto:yann.leventoux@unilim.fr)

## RESUME

Nous présentons des résultats expérimentaux d'une étude spectro-spatiale d'une raie Stokes engendrée par la propagation d'impulsions subnanosecondes dans une fibre multimode à gradient d'indice en régime d'instabilité paramétrique géométrique. Cette raie est constituée de plusieurs modes spatiaux confirmant ainsi l'aspect multimodal du processus.

**MOTS-CLEFS :** *fibre multimode à gradient d'indice, Instabilité paramétrique géométrique, conversion de fréquence.*

## 1. INTRODUCTION

Grâce à leurs dispersions modales réduites, les fibres multimodes à gradient d'indice (GRIN) offrent une grande distance d'interaction entre les modes guidés, permettant l'apparition de nouvelles dynamiques non linéaires. Parmi ces effets nous pouvons citer, entre autres : les solitons multimodaux, la génération de raies spectrales via l'instabilité paramétrique géométrique (GPI), l'auto-nettoyage Kerr, la génération de supercontinuum [1-6].

La génération de raies paramétriques par GPI dans le régime de dispersion normal d'une fibre GRIN a été expérimentalement rapportée par Krupa *et al.* [5]. Ces instabilités sont engendrées par un effet spatio-temporel qui s'appuie sur des mélanges paramétriques à quatre ondes mis en phase par une modulation périodique de l'indice du cœur de la fibre. Cette modulation est induite par le battement de multiples modes transverses (effet d'auto-imagerie périodique) associé à l'effet Kerr optique. L'aspect multimode du rayonnement se propageant dans le cœur de la fibre permet d'obtenir simultanément plusieurs mélanges paramétriques impliquant différents modes transverses. Les conversions de fréquences sont alors obtenues pour une longueur d'onde quasi identique mais sur des modes transverses différents. Il est ainsi très difficile de connaître précisément le contenu modal de la conversion multiple que l'on appelle GPI. Il est également important de noter que ce processus de conversion est également accompagné d'un phénomène d'auto-nettoyage Kerr qui a pour effet de faire converger une grande partie de l'énergie couplée dans la fibre vers un mode transverse unique [6].

Dans ce travail, nous avons expérimentalement réalisé un ensemble de cartographies spectro-spatiales à haute résolution spectrale (0.2nm) permettant de déterminer le contenu modal d'une raie Stokes lié au processus GPI. Nous mettons alors expérimentalement en évidence la nature multimodale de la génération paramétrique dans les fibres GRIN.

## 2. EXPERIENCE

Le banc expérimental est basé sur un laser microchip délivrant des impulsions de 740 ps à une cadence de 27 kHz, centrées sur 1064 nm. Le faisceau gaussien de 20  $\mu\text{m}$  de diamètre ( $@1/e^2$ ) avec un état de polarisation linéaire est injecté dans une fibre GRIN. Celle-ci a une longueur de 2,50 m, un rayon de cœur de 25  $\mu\text{m}$ , une différence d'indice cœur gaine de 0,015, et une ouverture numérique de 0,2.

Pour une puissance crête d'entrée de seulement 50 W, nous obtenons, en sortie de fibre, un faisceau faiblement multimode (fig. 1(a)). Pour une puissance plus élevée proche de 32 kW, un effet d'autonettoyage spatial est obtenu avec une forte partie de l'énergie confinée dans le mode fondamental (fig. 1(b)). Il est important de noter que si la photo de la figure 1(b) ressemble fortement au mode unique fondamental, une partie non négligeable de l'énergie ( $>15\%$ ) se propage sur plusieurs autres modes spatiaux créant ainsi un fond résiduel multimode [5-6].

Pour une puissance de 32 kW et une orientation précise de l'état de polarisation linéaire à l'entrée de la fibre nous avons obtenu la génération de raies paramétriques dans le proche infrarouge avec une onde Stokes à 1972 nm et une onde anti-Stokes à 732 nm (Voir fig. 1). Le décalage spectral est alors de plus de 129.8 THz en prenant une onde de pompe centrée à 1064 nm. Les profils transverses des ondes anti-Stokes et Stokes sont alors montrés sur la figure 1(c) et 1(d). Les filtres permettant de sélectionner ces radiations avaient une largeur de  $\pm 40$  nm pour l'anti-Stokes et  $\pm 250$  nm pour la raie Stokes.

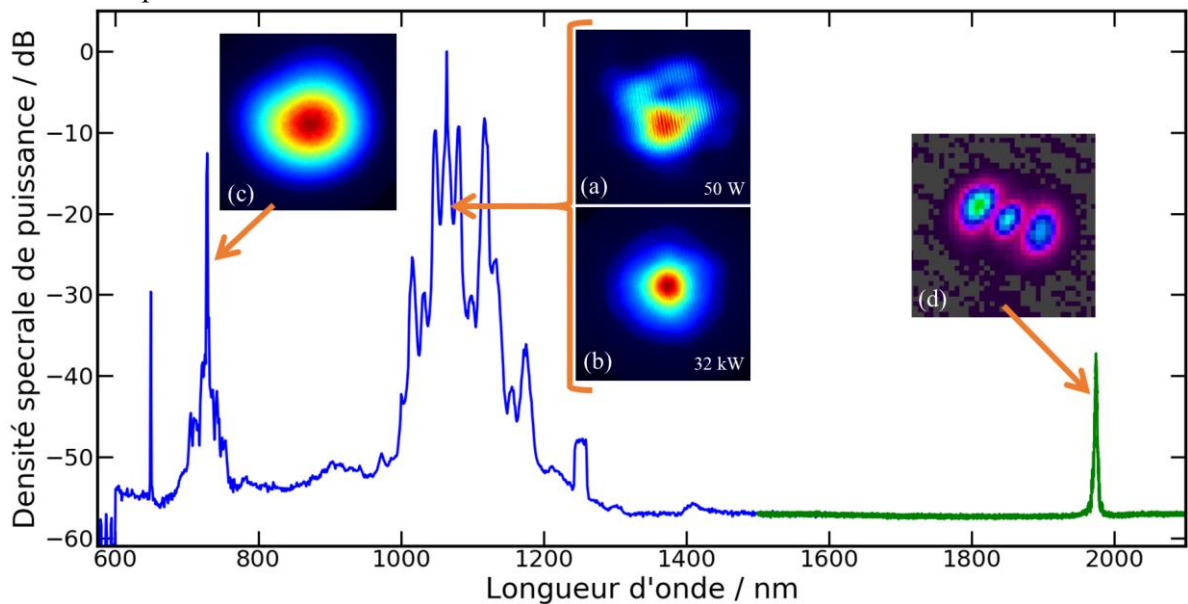


Fig. 1 : Profil spectral de l'onde de pompe (1064 nm) et des ondes Stokes (1972 nm) et anti-Stokes (732 nm) engendrée par GPI dans une fibre GRIN 50/125, pris avec deux OSA différents; (a)-(b) Images du profil du faisceau de pompe à faible puissance et à forte puissance; (c)-(d) images du profil des ondes anti-Stokes et Stokes.

Dans le but d'améliorer la résolution spectrale des images des raies paramétriques en sortie de fibre, nous avons mis au point une nouvelle méthode de cartographie spectro-spatiale. Celle-ci consiste à collecter, via une fibre optique monomode, l'énergie contenue dans chaque pixel de l'image agrandie du faisceau et à en mesurer le spectre via un analyseur de spectre optique (OSA), Yokogawa AQ6375B. L'utilisation d'un OSA permet alors d'avoir une très forte dynamique ( $>70$  dB) et une résolution spectrale largement inférieure au nanomètre (Rés : 0.2 nm) dans la zone d'intérêt. Nous obtenons alors une matrice 3D permettant de reconstruire, pour chaque longueur d'onde, le profil en intensité du faisceau de sortie. Un exemple d'analyse spectro-spatiale est représenté sur la figure 2.

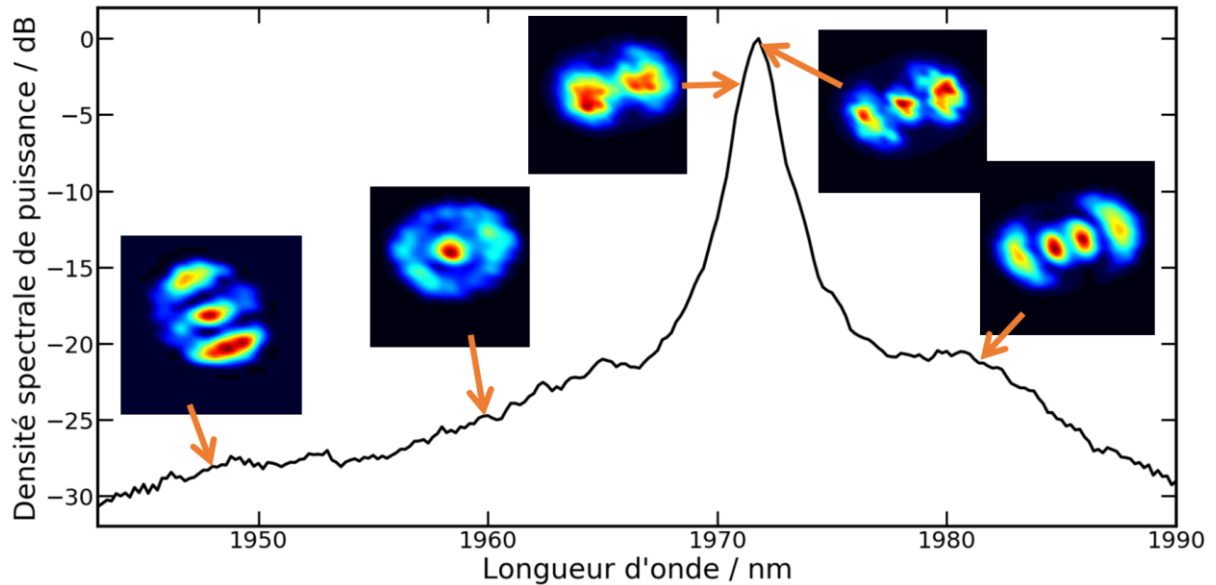


Fig. 2 : Profil spectral de l'onde Stokes engendrée par GPI dans une fibre GRIN 50/125 avec reconstruction locale du profil du faisceau en sortie.

Nous pouvons observer, sur la figure 2, la répartition transverse de l'énergie de la raie Stokes en fonction de la longueur d'onde. Le spectre montré sur la figure est le spectre moyenné sur tous les pixels du faisceau en sortie de la fibre GRIN pour une puissance de 32 kW. L'énergie centrale (à 1972 nm) est essentiellement véhiculée par les modes LP11, et une association des modes LP02 et LP21. En s'éloignant du pic d'intensité maximale, on peut observer que les modes LP02, LP12 et LP21 transportent le reste de l'énergie convertie qui forme un piédestal de plusieurs dizaines de nm de large.

## CONCLUSION

Nous avons développé une nouvelle méthode de mesure spectro-spatiale haute résolution permettant d'obtenir le contenu modal de rayonnements convertis par mélange à quatre ondes. Nous avons expérimentalement montré l'aspect multimodal des raies paramétriques générées par GPI dans une fibre GRIN pompée par des impulsions subnanosecondes à 1064 nm. La première raie Stokes mesurée à 1972 nm est constituée des modes LP01, LP02 et LP21. Ces travaux complètent l'étude menée par Krupa *et al.* [5], ainsi que l'étude menée par Bendahmane *et al.* concernant la génération d'onde paramétriques par effet intermodal [7].

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Picozzi, G. Millot, and S. Wabnitz, "Nonlinear virtues of multimode fibre," *Nat. Photonics* 9, 289–291 (2015).
- [2] W. H. Renninger and F. W. Wise, "Optical solitons in graded-index multimode fibres," *Nat. Commun.* 4, 1719 (2012).
- [3] L. G. Wright, S. Wabnitz, D. N. Christodoulides, and F. W. Wise, "Ultrabroadband dispersive radiation by spatiotemporal oscillation of multimode waves," *Phys. Rev. Lett.* 115, 223902 (2015).
- [4] S. Longhi, "Modulation instability and space-time dynamics in nonlinear parabolic-index optical fibers," *Opt. Lett.* 28, 2363–2365 (2003).
- [5] K. Krupa, A. Tonello, A. Barthélémy, V. Couderc, B. M. Shalaby, A. Bendahmane, G. Millot, and S. Wabnitz, "Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging of multimode waves," *Phys. Rev. Lett.* 116, 183901 (2016).
- [6] K. Krupa *et al.*, "Spatial beam self-cleaning in multimode fiber," *Nat. Photon.* 11, p. 237 (2017).
- [7] A. Bendahmane, K. Krupa, A. Tonello, D. Modotto, T. Sylvestre, V. Couderc, S. Wabnitz, and G. Millot, "Seeded intermodal four-wave mixing in a highly multimode fiber," *J. Opt. Soc. Am. B* 35, 295–301 (2018).