

CONVERSIONS DE FREQUENCE ULTRA LARGE BANDE PAR MELANGE A QUATRE ONDES INTERMODAL EN CASCADE DANS LES FIBRES MULTIMODES

Richard Dupiol^{1,2}, Abdelkrim Bendahmane¹, Katarzyna Krupa^{1,2}, Alessandro Tonello², Marc Fabert², Bertrand Kibler¹, Thibaut Sylvestre³, Alain Barthélémy², Vincent Couderc², Stefan Wabnitz⁴, et Guy Millot¹

¹ *Université Bourgogne Franche-Comté, ICB UMR CNRS 6303, 21078 Dijon, France*

² *Université de Limoges, XLIM UMR CNRS 7252, 87060 Limoges, France*

³ *Université de Bourgogne Franche-Comté, FEMTO-ST UMR CNRS 6174, 25030 Besançon, France*

⁴ *Università di Brescia, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione and INO-CNR, 25123 Brescia, Italy ; Novosibirsk State University, 1 Pirogova str., Novosibirsk 630090, Russia*

r.dupiol@hotmail.fr

RÉSUMÉ

Nous mettons en évidence des effets de conversion spectrale paramétrique avec des décalages spectraux très importants (~200THz) dans une fibre à gradient d'indice qui, pompée avec une source laser picoseconde à 1064nm, supporte quatre modes de propagation. À travers des études expérimentales, analytiques et numériques détaillées, nous montrons que les multiples raies paramétriques sont générées par un processus en cascade complexe faisant intervenir des mélanges à quatre ondes intermodaux. Les longueurs d'onde paramétriques résultantes s'étendent dans le visible jusqu'à 410nm et dans le proche infrarouge jusqu'à 1355nm.

MOTS-CLEFS : *dynamique spatio-temporelle ; conversion de fréquence ; fibre multimode à gradient d'indice ; mélange à quatre ondes intermodal*

1. INTRODUCTION

Les recherches sur les fibres optiques multimodes connaissent un fort développement depuis quelques années motivé par le désir de dépasser les capacités de transmission d'informations autorisées actuellement par les fibres monomodes. Dans cette problématique le multiplexage spatial modal offre une voie de recherche privilégiée en vue de surpasser la saturation des réseaux à fibres optiques monomodes. Les recherches sur les fibres multimodes à gradient d'indice (GRIN) se sont particulièrement accrues car elles sont un support idéal pour étudier les interactions non-linéaires entre les différents modes qui se propagent à des vitesses quasi-identiques [1]. Puisque dans ces fibres GRIN les constantes de propagation prennent des valeurs discrètes équidistantes le comportement non-linéaire par accord de phase offre une grande possibilité de combinaisons modales [2,3].

Dans ce contexte, de nombreux travaux ont porté sur les dynamiques du mélange à quatre ondes intermodal dans les fibres GRIN multimodes. Il y a toutefois deux cas à considérer selon que la fibre est *fortement* ou *faiblement* multimode. En effet, lorsqu'un grand nombre de modes est excité, les fréquences des raies paramétriques peuvent être calculées à partir d'une approche collective impliquant la dynamique du champ total, comme cela est développé dans les travaux théoriques de Longhi [4] et vérifié expérimentalement par Krupa et ses collaborateurs [5]. Pour les fibres faiblement multimodes, les termes de couplage non-linéaire sont moins nombreux que dans le cas précédent : les fréquences des raies peuvent être obtenues à partir des conditions d'accord de phase intervenant dans le processus de mélange à quatre ondes intermodal. Mafi et ses collaborateurs ont ainsi revisité la théorie du mélange à quatre ondes intermodal dans les fibres GRIN faiblement multimodes pour une

configuration de modes dégénérés spatialement sur la pompe, et ont dérivé des expressions analytiques pour les fréquences des raies paramétriques, leur composition modale, et l'efficacité de la conversion [2,3].

2. EXPERIENCE

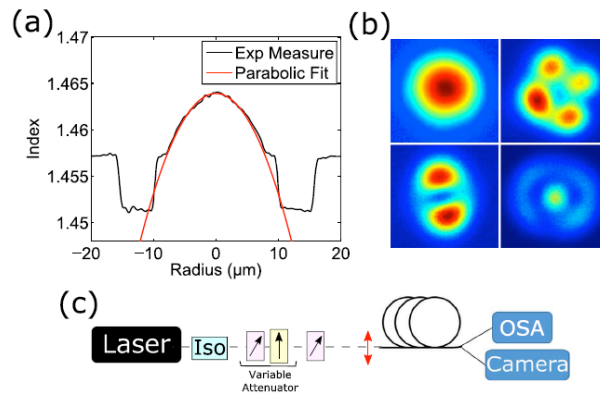


Fig. 1 (a) Profil d'indice de réfraction mesuré à 632nm. La ligne rouge indique un ajustement parabolique sur la partie centrale. (b) Groupe de modes spatiaux expérimentalement identifiés à 1064nm. (c) Montage expérimental. ISO, isolateur optique ; OSA, analyseur de spectre optique.

Dans notre étude nous considérons une fibre GRIN présentant le profil parabolique de la figure 1(a). Cette fibre est excitée par un faisceau laser constitué d'impulsions de 400 picosecondes à 1064nm (282THz). À cette longueur d'onde, la fibre supporte exactement quatre modes, tels que montrés sur la figure 1(b). Les conditions d'injection la lumière dans la fibre ont été optimisées pour exciter le mode fondamental LP_{01} . Nous avons observé expérimentalement que les raies paramétriques s'étendent de 410nm jusqu'à 1355nm (figure 2), ce qui est la plus large gamme de fréquences observée dans une fibre faiblement multimode jusqu'à aujourd'hui. La condition d'accord de phase pour deux photons initiaux dans le mode LP_{01} (configuration dégénérée) nous a permis d'estimer un décalage fréquentiel par rapport à la pompe de l'ordre de 200THz pour la première raie paramétrique. La raie anti-Stokes d'ordre un présente une forte intensité et se situe à une longueur d'onde de 625 nm (figure 2) alors que la raie Stokes conjuguée se situant à plus de 3 microns est très fortement absorbée (non observée).

3. ROLE D'UNE POMPE SECONDAIRE

Compte-tenu du décalage fréquentiel très important les raies Stokes d'ordres supérieurs ne peuvent pas se développer (décalage fréquentiel supérieur à 282 THz) ; l'énergie de l'onde à 1064nm est ainsi transférée essentiellement dans la raie Stokes à 625nm qui joue alors le rôle d'une pompe secondaire. En outre, la durée d'impulsion des bandes latérales paramétriques peut être beaucoup plus courte que la durée d'impulsion d'entrée, ce qui conduit à des puissances crêtes plus élevées et augmente considérablement l'efficacité de la conversion paramétrique. Dans notre exemple, la durée d'impulsion de la raie à 625 nm est égale à 32 ps, mesurée en utilisant un photo-détecteur rapide (temps de montée de 14ps) et un oscilloscope temps réel à large bande passante (50GHz). La raie à 625nm est alors à l'origine des nombreuses raies paramétriques observées dans le visible (figure 2).

Afin de mieux comprendre les processus complexes de conversion de fréquence dans la fibre GRIN faiblement multimode, nous avons réalisé des simulations numériques basées sur la résolution d'une équation de Schrödinger non-linéaire spatio-temporelle à (3+1) dimensions. La source laser a été modélisée par un faisceau gaussien d'un diamètre à mi-hauteur de $12\mu\text{m}$, et le profil parabolique de l'indice a été calibré sur celui des mesures d'indice de la fibre (figure 1(a)). Les résultats des simulations numériques sont reportés sur la figure 3. Avec une onde injectée à 1064nm, deux bandes spectrales sont calculées à 633nm et 540nm (première et seconde raies anti-Stokes). D'autre part pour

une onde injectée à 633nm (longueur d'onde de la première raie anti-Stokes jouant le rôle de pompe secondaire), nous obtenons numériquement cinq ordres paramétriques anti-Stokes : 514nm (ordre 1) ; 477nm (ordre 2) ; 452nm (ordre 3) ; 434nm (ordre 4) ; et 416 nm (ordre 5) en bon accord avec les mesures expérimentales (figure 2). Les raies calculées à 818nm et 934nm correspondent aux deux premiers ordres Stokes générés par la raie à 625nm.

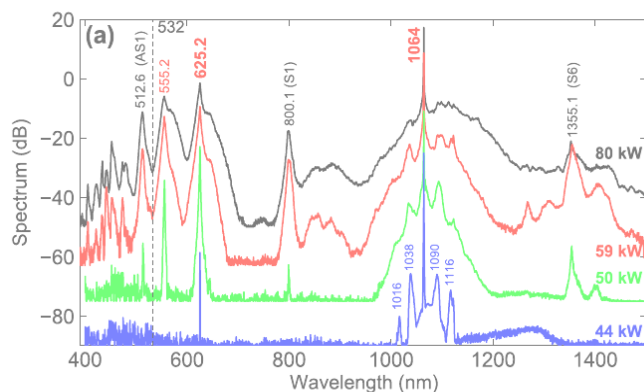


Fig. 1 (a) Spectre en sortie enregistré pour une puissance crête initiale de 44kW (courbe bleue), 50kW (courbe verte), 59kW (courbe rouge), et 80kW (courbe noire).

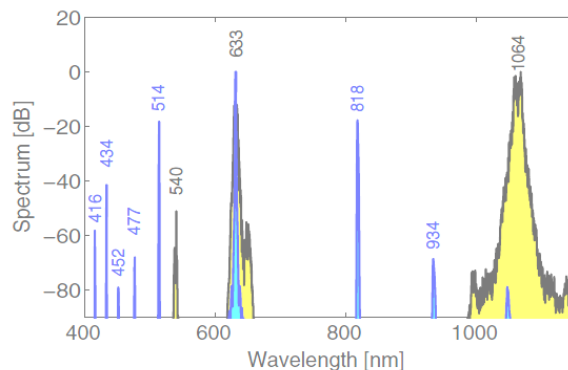


Fig. 2 Courbe noire : simulation pour une onde initiale à 1064nm d'intensité $I=50\text{GW/cm}^2$, longueur de fibre $L=35\text{cm}$. Courbe bleue : Simulation pour une onde initiale à 633nm d'intensité $I=20\text{GW/cm}^2$, longueur de fibre $L=10\text{cm}$.

CONCLUSION

Nous avons observé des conversions de fréquence à ultra larges décalages fréquentiels (de 200 jusqu'à 450THz) par mélange à quatre ondes intermodal dans une fibre GRIN supportant quatre modes à la longueur d'onde de 1064nm. Nous avons identifié un nouveau processus non-linéaire en cascade, la première raie paramétrique anti-Stokes à 625nm agissant comme pompe secondaire. Malgré la complexité des processus physiques mis en jeu un bon accord expérience-théorie a été obtenu [6]. Pour des applications futures, nos observations ouvrent une voie nouvelle pour la conversion de fréquences et la génération de supercontinuum allant jusque dans le visible et le proche UV.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Picozzi, G. Millot, and S. Wabnitz, "Nonlinear virtues of multimode fiber," *Nat. Photonics*, vol. 9, pp. 289, 2015.
- [2] A. Mafi, "Pulse Propagation in a Short Nonlinear Graded-Index Multimode Optical Fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, pp. 2803-2811, 2012.
- [3] E. Nazemosadat, H. Pourbeyram, and A. Mafi, "Phase-matching for spontaneous frequency conversion via four-wave mixing in graded-index multimode optical fibers," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 33, pp. 144-150, 2016.
- [4] S. Longhi, "Modulational instability and space-time dynamics in nonlinear parabolic-index optical fibers," *Opt. Lett.*, vol. 28, pp. 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.*, vol. 116, article 183901, 2016.
- [6] R. Dupiol, A. Bendahmane, K. Krupa, A. Tonello, M. Fabert, B. Kibler, T. Sylvestre, A. Barthélémy, V. Couderc, S. Wabnitz, and G. Millot, "Far-detuned cascaded intermodal four-wave mixing in a multimode fiber," *Opt. Lett.*, vol. 42, pp. 1293-1296, 2017.