

EFFET NON LINEAIRE SPATIO-TEMPOREL DANS LES FIBRES MULTIMODALES

Katarzyna Krupa¹, Richard Dupiol^{1,2}, Romain Guenard², Badr Shalaby^{2,5}, Abdelkrim Bendahmane¹, Marc Fabert², Alessandro Tonello², Vincent Kermene², Agnès Desfarges-Berthelemot², Jean-Louis Auguste², Alain Barthelemy², Guy Millot¹, Daniele Modotto³, Stefan Wabnitz^{3,4} and Vincent Couderc²

¹ Université Bourgogne Franche-Comté, ICB UMR 6303, 9 Avenue A. Savary, 21078 Dijon, France

² Université de Limoges, XLIM, UMR CNRS 7252, 123 Avenue A. Thomas, 87060 Limoges, France

³ Laboratorio Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Brescia and INO-CNR, Via Branze 38, 25123 Brescia, Italy

⁴ Novosibirsk State University, 1 Pirogova str., Novosibirsk 630090, Russia

⁵ Physics Department, Faculty of Science, Tanta University, Egypt

Vincent.couderc@xlim.fr

RÉSUMÉ

Les fibres multimodales représentent un terrain particulièrement intéressant pour étudier les effets non linéaires spatio-temporels. Nous proposons ici une revue des résultats obtenus sur un phénomène d'auto-organisation de la lumière qui conduit à une sélection modale sous l'influence de la non-linéarité Kerr. Nous montrons comment il est possible d'étendre ce phénomène passif à des guides amplificateurs et à des sources lasers produisant de fortes puissances crêtes. Le doublage de fréquence à nettoyage spatial, basé sur un effet de « poling » optique, est également abordé.

MOTS-CLEFS : *Phénomène spatio-temporel, Propagation non linéaire, Auto-organisation de la lumière, conversion de fréquence.*

1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent les fibres multimodales étaient connues pour leur grande capacité à guider de la puissance. Malheureusement la propagation simultanée d'un grand nombre de modes transverses n'a pas permis de valider ces fibres pour de nombreuses applications. Leur capacité à propager simultanément un grand nombre de modes se traduit par une dégradation importante du faisceau guidé tant dans le domaine spatial que dans le domaine temporel. Récemment les fibres multimodales sont apparues comme étant des outils particulièrement intéressants pour étudier les phénomènes spatio-temporels complexes [1]. Pour exemple, dans le domaine de dispersion anormale et pour des fibres avec un profil d'indice parabolique (fibre de type GRIN), la propagation de solitons multimodaux a été observée [2]. Leurs oscillations périodiques ont notamment permis de contrôler la génération d'ondes dispersives large bande [3,4]. Avec une dispersion normale, l'utilisation d'impulsions picosecondes et nanosecondes a permis d'obtenir la génération de nouvelles fréquences dont l'écart spectral s'étend de l'UV-Visible au moyen infrarouge. Le mécanisme non linéaire sous-jacent est une instabilité de modulation induite par l'imagerie périodique observée dans les fibres multimodales à gradient d'indice (GRIN) grâce à l'implication de la susceptibilité non linéaire d'ordre trois [5,6]. De nouvelles longueurs d'onde ont également pu être obtenues à partir d'une pompe à 1064 nm et cela grâce à un processus cascadié de multiples mélanges à quatre ondes dans une fibre faiblement multimode [7].

Avant d'obtenir la génération de nouvelles fréquences, le battement modal combiné à l'effet Kerr engendre une auto-organisation spatiale de la lumière avec un transfert privilégié de l'énergie propagée par les modes d'ordre haut vers le mode fondamental qui présente alors un profil lisse de type gaussien [8] (figure 1).

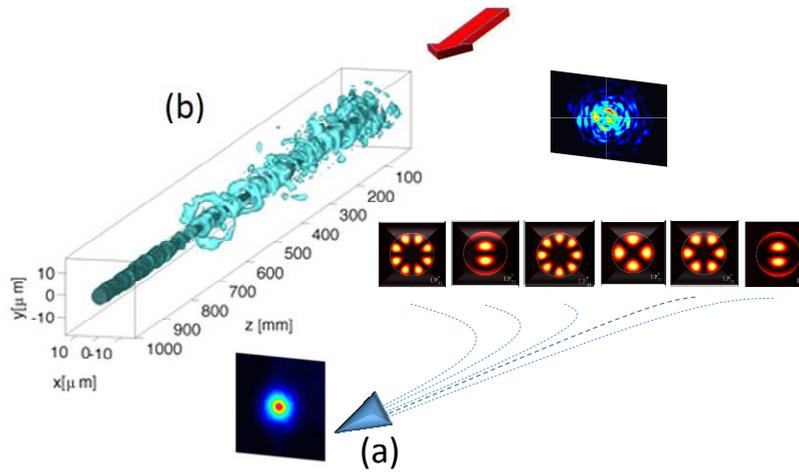


Fig. 1 : Représentation schématique de l'auto-organisation spatiale de la lumière dans une fibre optique multimodale à profil d'indice de réfraction parabolique ; (a) résultat expérimental, (b) simulations numériques.

L'implication secondaire de l'effet Raman facilite l'extension des conversions non linéaires vers l'infrarouge tout en confortant l'auto-organisation spatiale et en créant un spectre large jusqu'à 2.4 μm dans une fibre en silice [9] (figure 2).

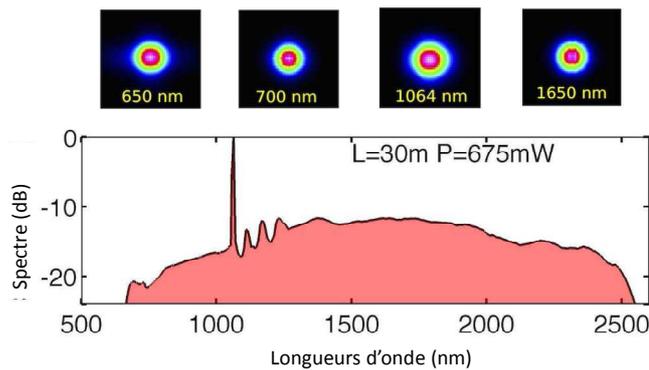


Fig. 2 : Démonstration expérimentale de la génération d'un supercontinuum dans une fibre optique multimodale à profil d'indice de réfraction parabolique grâce à une auto-organisation spatiale de la lumière.

L'utilisation d'une fibre optique amplificatrice multimodale a également permis de démontrer cet effet d'auto-organisation en présence de gain laser et en utilisant un signal aussi faible que 500 W crête. Malgré que le profil d'indice de réfraction du cœur de la fibre soit sensiblement différent d'une fonction parabolique, l'impact du battement entre les modes est suffisamment efficace pour obtenir une émission quasi-unimodale [10]. Enfin, nous montrons comment le « poling » optique d'une fibre GRIN dopée germanium génère un double réseau longitudinal permettant de faire cohabiter un effet de nettoyage spatial avec un effet de génération de second harmonique induit par l'inscription d'une non-linéarité d'ordre deux ($\chi^{(2)}$) au sein de la fibre .

L'influence de ces deux phénomènes permet d'obtenir des longueurs d'onde supplémentaires principalement réparties proche de l'onde à la fréquence double [11].

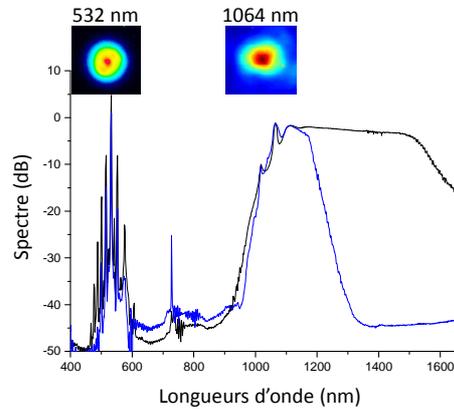


Fig. 3 : Spectre obtenu après « poling » optique d'une fibre multimodale dopée germanium à profil d'indice de réfraction parabolique

CONCLUSION

Nous avons démontré qu'une auto-organisation de la lumière pouvait être obtenue dans une fibre optique multimodale à profil d'indice de réfraction parabolique. Le faisceau de sortie est alors principalement constitué du mode à profil gaussien dont les paramètres sont proches de celui du mode fondamental. Ce concept est basé sur des mélanges paramétriques accordés en phase par le phénomène d'imagerie périodique combiné à l'effet Kerr optique. Ce phénomène a également été étendu à des fibres multimodales actives qui possèdent des profils non paraboliques proches d'un saut d'indice. La combinaison avec un effet de « poling » permet d'élargir encore les conversions non linéaires grâce à un double effet périodique, l'un à l'échelle millimétrique et utilisant la susceptibilité $\chi(3)$, l'autre dans le domaine micrométrique exploitant un $\chi(2)$ photo-induit.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Picozzi, G. Millot, and S. Wabnitz, "Nonlinear virtues of multimode fibre," *Nat. Photon.* 9, 289-291, 2015.
- [2] W. H. Renninger, and F. W. Wise, "Optical solitons in graded-index multimode fibres," *Nat. Commun.* 4 1719, 2013.
- [3] L. G. Wright, D. N. Christodoulides, and F. W. Wise, "Controllable spatiotemporal nonlinear effects in multimode fibres," *Nat. Photon.* 9, 306-310, 2015.
- [4] 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
- [5] K. Krupa, A. Tonello, A. Barthélémy, V. Couderc, B. Mohamed 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] L. G. Wright, Z. Liu, D. A. Nolan, M. Jun Li, D. N. Christodoulides and F. W. Wise, "Self-organized instability in graded index multimode fibre," *Nat. Photon.* 10, 771-776, 2016.
- [7] R. Dupiol, A. Bendahmane, K. Krupa, A. Tonello, M. Fabert, B. Kibler, T. Sylvestre, A. Barthelemy, V. Couderc, S. Wabnitz, and G. Millot, "Far-detuned cascaded intermodal four-wave mixing in a multimode fiber," *Optics Letters* 42, 1293-1296, 2017.
- [8] K. Krupa, A. Tonello, B. M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc, "Spatial beam self-cleaning in multimode fiber," [arXiv.org/abs/1603.02972](https://arxiv.org/abs/1603.02972) [physics.optics], and *Nat. Photon.* doi.org: 10.1038/nphoton.2017.32, 2017.
- [9] K. Krupa, C. Louot, V. Couderc, M. Fabert, R. Guenard, B. M. Shalaby, A. Tonello, D. Pagnoux, P. Leproux, A. Bendahmane, R. Dupiol, G. Millot, and S. Wabnitz, "Spatiotemporal characterization of supercontinuum extending from the visible to the mid-infrared in multimode graded-index optical fiber," *Opt. Lett.* 41, 5785-5788, 2016.
- [10] R. Guenard, K. Krupa, R. Dupiol, M. Fabert, A. Bendahmane, V. Kermene, A. Desfarges-Berthelemot, J. L. Auguste, A. Tonello, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, and V. Couderc, "Kerr self-cleaning of pulsed beam in an ytterbium doped multimode fiber," *Optics Express* 25, 4783-4792, 2017.
- [11] D. Ceoldo, K. Krupa, A. Tonello, V. Couderc, D. Modotto U. Minoni, G. Millot, and S. Wabnitz, "Second harmonic generation in multimode graded-index fibers: spatial beam cleaning and multiple harmonic sideband generation," *Optics Letters* 42, 971-974, 2017.

METHODE D'ANALYSE DU CONTENU MODAL DE FIBRES OPTIQUES LEGEREMENT MULTIMODES

J. Yammine¹, E. R. Andresen¹, J.-B. Trinel¹, Y. Quiquempois¹, M. Bigot², P. Sillard², L. Bigot²

¹Univ. Lille, CNRS, UMR 8523 - PhLAM - Physique des Lasers Atomes et Molécules, F-59000
Lille, France

²Prysmian Group, Parc des Industries Artois Flandres, 62092 Haisnes Cedex, France

jean.yammine@ed.univ-lille1.fr

RÉSUMÉ

L'analyse du contenu modal des fibres optiques multimodes permet de décomposer les répartitions d'intensité complexes issues de ces fibres sur une base de modes connue. Une méthode simple et pratique a été mise en place ici afin d'identifier les différents modes d'une fibre légèrement multimode supportant 12 modes spatiaux.

MOTS-CLEFS : *Fibre légèrement multimode, matrice de transmission, contenu modal*

1. INTRODUCTION

Les débits maximaux envisageables dans les réseaux de télécommunications fibrés actuels sont aujourd'hui en partie limités par les fibres monomodes à des valeurs avoisinant 100 Tbits/s [1]. L'utilisation de fibres optiques légèrement multimodes (FMF) et de la technique de multiplexage modal (MDM) apparaît depuis quelques années comme une solution qui permet de dépasser ces limites : théoriquement, chaque mode d'une FMF peut transmettre une capacité équivalente à celle d'une fibre monomode et, par suite, une FMF supportant N modes donnera accès à la capacité de N fibres monomodes. La méthode d'analyse des données en sortie d'une telle fibre (DSP combiné à un traitement MIMO) dépend beaucoup des propriétés de guidage de cette dernière et notamment de paramètres tels que le niveau de diaphonie - lié au couplage entre modes - ou encore les différences de vitesse de groupe entre les modes [1]. Afin de pouvoir évaluer les potentialités offertes par ce type de fibre pour la technologie MDM, il est donc nécessaire de connaître et d'étudier leur contenu modal en fonction des conditions d'utilisation. Plusieurs techniques ont été développées dans ce but telles que la méthode d'imagerie d'intercorrélation C^2 ou encore la méthode S^2 dans ses versions standards et avancées [2]. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'identification des différents modes propres en sortie d'une FMF supportant 12 modes spatiaux (7 groupes de modes Linéairement Polarisés (LP)) via la mesure de sa matrice de transmission à l'aide d'un modulateur spatial de lumière (SLM) [3,4].

2. METHODE EXPERIMENTALE

Afin d'étudier la composition de la lumière issue de la FMF, nous avons mis en place une expérience d'interférométrie dans laquelle la fibre sous test se trouve dans un bras d'un interféromètre de Mach-Zehnder (voir Figure 1). La lumière issue d'une source laser accordable en bande C est collimatée à l'aide d'une lentille convergente et ensuite divisée par un cube polariseur (PBS) en deux faisceaux de polarisations orthogonales : le premier faisceau (signal) possède une polarisation parallèle à celle du SLM et subit donc une réflexion sur l'écran de ce dernier. Des masques de phase spécifiques générés par ordinateur sont appliqués sur le SLM afin de contrôler, ensuite, l'injection de la lumière dans la FMF. Ce faisceau traverse une série de lentilles avant d'être injecté dans la fibre. En sortie de fibre, ce faisceau passe à travers un second PBS pour filtrer sa polarisation, puis à travers une séparatrice 50/50 (BS) avant d'atteindre une caméra InGaAs. Le second faisceau (référence) prend un chemin différent : sortant de l'autre partie du premier PBS, il subit des réflexions successives sur des miroirs, traverse une lame demi-onde, puis atteint la séparatrice 50/50 et enfin le capteur de la caméra où il interfère avec le faisceau signal.

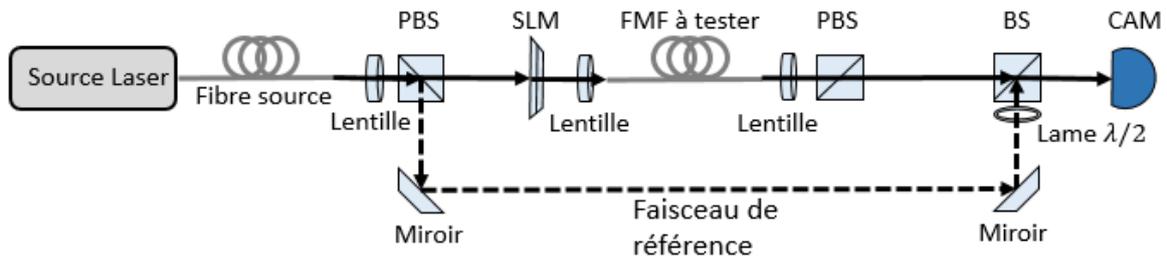


Fig. 1 : Schéma expérimental de l'expérience mise en place. Afin de simplifier le schéma, le SLM est ici présenté selon un fonctionnement en transmission.

Les images obtenues sur la caméra (franges d'interférence) sont traitées pour extraire le contenu modal de la fibre comme cela est représenté sur la Figure 2 : les données subissent une première transformée de Fourier (a), sont filtrées de la composante continue et du bruit (b), subissent une transformée de Fourier inverse (c) - on retrouve alors le champ du signal issu de la FMF - et finalement sont ré-échantillonnées (d). L'association des images obtenues à l'étape (d) avec des masques successivement appliqués sur le SLM permet d'aboutir à la formation de la matrice de transmission (e) dont chaque ligne correspond à la matrice de l'étape précédente convertie en forme vectorielle et chaque colonne correspond à un masque distinct appliqué sur le SLM. Les vecteurs propres de la matrice de transmission nous donnent alors les champs des modes propres de la FMF (f).

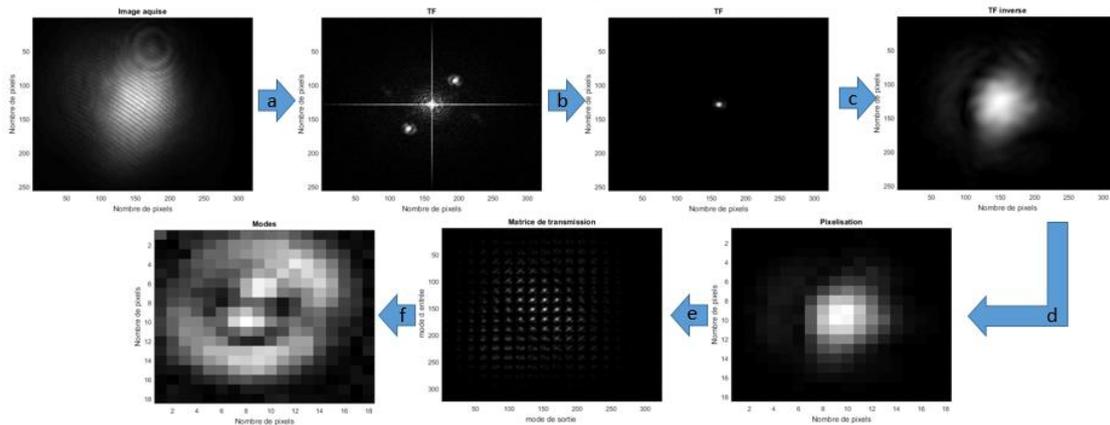


Fig. 2 : Schéma illustrant les grandes étapes de l'analyse des données issues de l'expérience de la Figure 1.

RESULTATS

Une FMF à profil de type saut d'indice réalisée par Draka-Prysmian Group a été testée à la longueur d'onde de 1570 nm [5]. La longueur de fibre sous test est de 82 cm. Parallèlement, les modes de cette fibre ont été calculés via un code développé au sein de notre laboratoire et il ressort que cette fibre supporte 12 modes à la longueur d'onde de l'étude. Les répartitions d'intensité des modes issus du traitement décrit sur la Figure 2 sont affichées sur la Figure 3(a) où elles sont comparées aux modes théoriques (Figure 3 (b)) : nous identifions clairement les premiers modes LP d'une fibre saut d'indice. Les résultats obtenus expérimentalement montrent un bon accord entre les résultats expérimentaux et la simulation. Un désaccord entre mesure et simulation est seulement observé pour les modes LP_{21} : pour les groupes de modes dégénérés spatialement, tel que les modes LP_{21} , les deux modes propres issus du traitement peuvent sembler en fait être deux combinaisons linéaires orthogonales des deux modes théoriques. Ces combinaisons sont, elles aussi, des modes propres.

Ces résultats préliminaires ouvrent plusieurs possibilités et perspectives pour de prochains travaux. Il est ainsi possible de mesurer simultanément un second état de polarisation afin de mesurer la matrice de transmission résolue en polarisation.

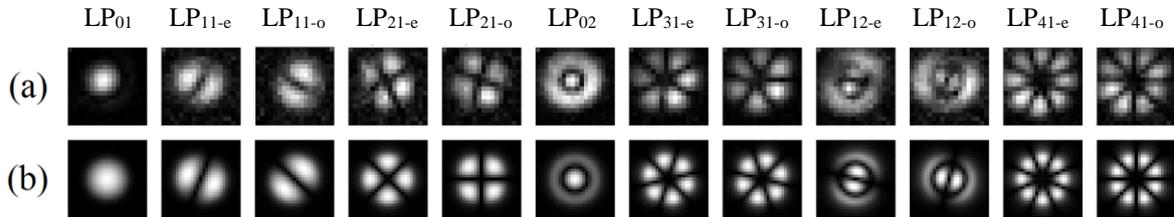


Fig. 3 : Schéma présentant les répartitions d'intensité des modes obtenus expérimentalement (a) et les modes calculés sur la base du profil d'indice réel de la fibre (b).

Nous envisageons également d'effectuer une mesure de la matrice de transmission en fonction de la longueur d'onde afin de mesurer la matrice de transmission résolue spectralement qui contiendrait toute l'information du comportement linéaire de la FMF et qui nous fournirait une analyse spatiale et spectrale du contenu modal des fibres. Un intérêt essentiel de la mesure de la matrice de transmission est qu'elle contient l'information sur l'amplitude et la phase. Une mesure de la matrice de transmission peut alors servir pour valider très finement les propriétés modales de la fibre sous test car seule la bonne base de modes permettra d'aboutir à une matrice diagonale, synonyme de correspondance parfaite entre les modes propres mesurés et les modes réels de la fibre.

CONCLUSION

Nous avons mis en œuvre une nouvelle méthode pour caractériser des fibres multimodes et analyser leur contenu modal. Cette méthode, appliquée ici à une FMF guidant 12 modes spatiaux, peut être adaptée à plusieurs types de fibres. Ce travail préliminaire suggère que cette technique possède ses propres atouts comparativement aux autres méthodes utilisées et semble prometteuse pour identifier les propriétés de guidage de fibres complexes.

Ce travail a été partiellement supporté par l'institut IRCICA, USR CNRS 3380 de l'Université de Lille (www.ircica.univ-lille1.fr). Ce travail a été partiellement financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche à travers le Contrat de Plan Etat-Région "Photonics for Society", le conseil Régional Hauts de France et le Fonds Européen de Développement Economique Régional, Labex CEMPI, Equipex FLUX à travers le Programme Investissements d'Avenir (PIA). Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet FUI MODAL (FUI-AAP19).

REFERENCE

- [1] Mitra P.P., and Stark J.B., *Nonlinear limits to the information capacity of optical fibre communications*, Nature, 411, 1027-1030 (2001)
- [2] Sévigny B., Le Cocq G., Carrero C.C.C., Valentin C., Sillard P., Bouwmans G., Bigot L., and Quiquempois Y., *Advanced S2 imaging: application of multivariate statistical analysis to spatially and spectrally resolved datasets*. J. Lightwave Technol., 32(23), 4606-4612 (2014).
- [3] Carpenter J., Eggleton B.J., and Schröder J., *110x110 optical mode transfer matrix inversion*, Opt. Express 22, 96-101 (2014)
- [4] Plöschner M., Tyc T., and Čížmár T., *Seeing through Chaos in Multimode Fibres*, Nature Photonics 9 529-535 (2015)
- [5] Bigot-Astruc M., Boivin D., and Sillard P., *Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers*, IEEE Summer Topicals Meeting TuC1.1 (2012)

MISE EN FORME ADAPTATIVE D'UN FAISCEAU FEMTOSECONDE AMPLIFIÉ DANS UNE FIBRE DOPEE FORTEMENT MULTIMODE

Raphaël Florentin, Vincent Kermène, Agnès Desfarges-Berthelemot, Joël Benoist et Alain Barthélémy

*XLIM Institut de Recherche UMR 7252, CNRS-Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas
8760 Limoges, France*

raphael.florentin@xlim.fr

RÉSUMÉ

Le contrôle spatial d'une impulsion femtoseconde en sortie d'un amplificateur multimode fibré a été obtenu. Il s'accompagne d'un raccourcissement du signal qui a été analysé.

MOTS-CLEFS : *Fibre multimode amplificatrice, impulsion femtoseconde, contrôle de front d'onde*

1. INTRODUCTION

Le contrôle spatial du faisceau transmis par une fibre optique multimode, s'inspirant de travaux effectués sur l'imagerie à travers les milieux diffusants [1], a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Il consiste le plus souvent à mettre en forme le front d'onde du faisceau qui excite la fibre, à l'aide d'un modulateur de phase spatial, afin d'obtenir la figure de sortie souhaitée. Parmi les différentes voies employées, la méthode adaptative consiste à établir les phases optimales à appliquer au modulateur via un algorithme itératif qui maximise (ou minimise) un signal de rétroaction acquis en sortie de fibre. D'autres méthodes de contrôle existent mais la méthode adaptative présente plusieurs avantages : elle ne requiert pas la mesure préalable de la matrice de transmission de la fibre, elle n'a pas besoin d'une onde de référence, et elle s'adapte aux perturbations subies par la fibre en cours d'utilisation. Des résultats de focalisation à travers une fibre multimode passive ont été obtenus par cette méthode dès 2012 [2] et plus récemment nous avons montré que la focalisation à travers un amplificateur multimode était possible même en régime de gain saturé [3]. Par ailleurs, certaines applications, comme l'imagerie non linéaire par exemple, nécessitent une excitation de forte intensité qui demande à la fois une focalisation spatiale et temporelle. La problématique est alors plus complexe puisque la propagation dans la fibre multimode s'accompagne de couplages spatio-temporels.

Dans ce travail, nous avons étudié la focalisation spatiale d'une impulsion femtoseconde à la sortie d'une fibre multimode amplificatrice. Des résultats numériques et expérimentaux seront présentés montrant que le profilage spatial peut aussi contrôler l'impulsion amplifiée et compenser les différences de vitesse de groupe.

2. EXPERIENCE

Le montage expérimental est présenté figure 1. Il est alimenté par un laser MIKAN (Amplitude) qui produit des impulsions de 180 fs à la longueur d'onde centrale de 1030nm. Le faisceau polarisé est envoyé sur un miroir déformable (Boston Micromachine kilo-DM). Le faisceau laser profilé est ensuite imagé sur l'entrée d'une fibre optique multimode. La fibre est à saut d'indice, avec un cœur de 90 μm de diamètre inclus dans une gaine hexagonal de 480 μm de large ; elle est uniformément dopée ytterbium sur la section du cœur. À la longueur d'onde de l'expérience, cette fibre guide 104 modes LP par polarisation. La longueur de fibre utilisée est de 1,3 m. En sortie, une diode de pompage multimode à 980nm est injectée de manière contra-directionnelle au signal, via une séparatrice dichroïque. Une photodiode est positionnée dans le plan où une lentille forme une image agrandie de la face de sortie de la fibre. Elle mesure la puissance contenue dans la

zone où l'on désire la focalisation en champ proche. Le filtrage est opéré par un diaphragme. Une autre photodiode (non représentée) permet d'acquérir la totalité de la puissance du signal émanant de la fibre. Le rapport entre l'intensité de la zone cible et l'intensité totale sert de métrique et de donnée d'entrée pour l'algorithme. Il s'agit d'un algorithme qui détermine la phase à appliquer à chaque actuateur du miroir déformable pour maximiser la métrique. Il procède en seulement 2 étapes de perturbations et 3 mesures (Algorithme à décalage de phase à 3 mesures [4]) qui sont répétées pour chaque élément à piloter (ou ensemble d'éléments si base d'Hadamard). Enfin une caméra et un autocorrélateur servent à caractériser d'une part l'image de l'intensité de sortie intégrée dans le temps et d'autre part la durée de l'impulsion de sortie intégrée spatialement.

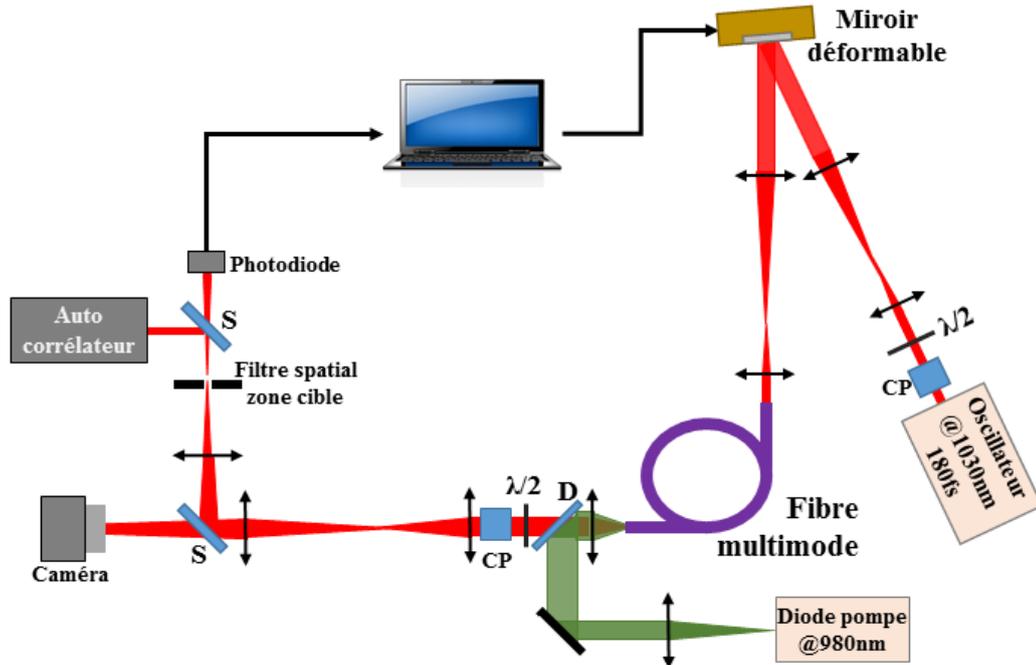


Fig. 1 : Schéma simplifié du montage expérimental, S : séparatrice, D : miroir dichroïque, CP : Cube polariseur.

3. RESULTATS

Nous avons cherché ici à confiner le faisceau amplifié sur une surface réduite du cœur de la fibre, représenté par un cercle pointillé noir sur la figure 2. Les images a) et c) présentent les états initiaux, sans mise en forme du front d'onde, respectivement dans le cas numérique et expérimental. Dans chacun des deux cas, un grand nombre de modes est excité dans la fibre mais le faisceau transmis a une structure granulaire faiblement contrastée car la différence de temps de groupe entre modes (~ 15 ps) est très supérieure à la durée de l'impulsion laser. Lorsque l'algorithme de mise en forme est lancé, la focalisation spatiale est obtenue en quelques secondes. Les figures 2 b) et 2 d) présentent les résultats enregistrés respectivement dans le cas numérique et dans le cas expérimental. Nous avons établi que lorsque le profilage d'entrée conduit à une focalisation spatiale sur le faisceau en sortie, il privilégie l'excitation de modes avec des vitesses de groupe proches les unes des autres. Cette condition est nécessaire afin d'assurer la sommation cohérente des champs modaux dans la zone cible. Les autocorrélations des impulsions amplifiées témoignent de ce couplage spatio-temporel. Sans mise en forme spatiale les impulsions de sortie s'étirent sur près de 13 ps (durée à mi-hauteur de l'autocorrélation 15 ps, Fig. 2 (f)). Avec contrôle spatial et focalisation, l'impulsion amplifiée se comprime fortement à ~ 700 fs (la durée à mi-hauteur de l'autocorrélation est divisée par 15), se lisse et le piédestal disparaît. Cette évolution est retrouvée par notre modèle numérique (Fig. 2 (e) autocorrélation de 470 fs de large à mi-hauteur) qui prédit cependant une durée encore plus courte proche de celle d'une impulsion monomode. La différence

entre les résultats numériques et expérimentaux peut être expliquée par le fait que numériquement la fibre est considérée comme droite alors qu'expérimentalement elle est courbée ce qui induit inévitablement des couplages modaux.

Par la suite, nous avons utilisé une photodiode à deux photons pour mesurer le signal spatialement filtré afin que l'optimisation se fasse avec une métrique intégrant plus directement à la fois les aspects spatiaux et temporels du rayonnement de sortie. Les résultats obtenus ont été identiques à ceux illustrés Fig. 2.

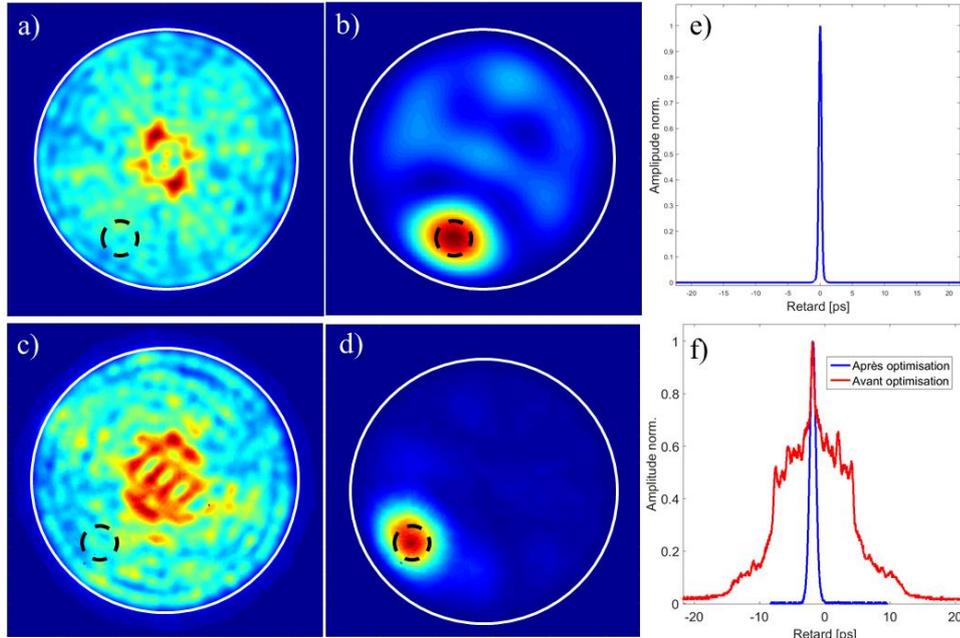


Fig. 2 : Ligne du haut : résultats numériques a) Sortie de fibre sans mise en forme, b) Sortie confinée sur la zone cible après profilage de l'entrée, e) autocorrélation de l'impulsion avec la mise en forme spatiale illustrée en b)

Ligne du bas : résultats expérimentaux c) Sortie de fibre sans mise en forme, d) Sortie confinée sur la zone cible après profilage de l'entrée f) autocorrélations des impulsions en sortie sans mise en forme (en rouge), et avec la mise en forme spatiale illustrée en d) (en bleu).

Dans chacun des cas, le cercle pointillé noir représente la zone cible et le cercle blanc représente la limite cœur gaine

CONCLUSION

Nous avons démontré que la mise en forme adaptative du front d'onde du faisceau laser injecté dans une fibre amplificatrice fortement multimode pouvait conduire en sortie à un profilage spatial sur un spot unique même en régime femtoseconde. Modélisations et expériences ont montré l'impact du profilage spatial sur la structure temporelle et permis d'identifier les conditions conduisant à des impulsions amplifiées subpicosecondes.

REFERENCES

- [1] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk, "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media," *Opt. Lett.* **32**(16), 2309–2311 (2007).
- [2] Reza Nasiri Mahalati, Daulet Askarov, Jeffrey P. Wilde, and Joseph M. Kahn, "Adaptive control of input field to achieve desired output intensity profile in multimode fiber with random mode coupling," *Opt. Express* **20**, 14321-14337 (2012).
- [3] Florentin, Raphael, et al. "Shaping the light amplified in a multimode fiber." *Light: Science & Applications* 6.2 (2017): e16208.
- [4] Peisen S. Huang and Song Zhang, "Fast three-step phase-shifting algorithm," *Appl. Opt.* **45**, 5086-5091 (2006)

NOUVEAUX PHENOMENES DE DÉGRADATION MODALE DANS LES FIBRES À LARGE CŒUR

Cyril Vinçont, Christophe Pierre, Jean-Paul Yehouessi, Philippe Morin, Sébastien Vidal, Alain Jolly, Johan Boulet

¹*Alphanov, Rue François Mitterrand 33400 Talence*

jeanpaul.yehouessi@alphanov.com

RÉSUMÉ

Nous rapportons l'existence d'un nouveau phénomène de dégradation modale dans les fibres à large cœur différent des traditionnelles instabilités modales connues à ce jour. Nous établissons ici un lien direct entre le photo-noircissement et la dégradation modale dans le cas des amplificateurs à fibre de fortes puissances.

MOTS-CLEFS : *Dégradations modales; Instabilités de modales; laser à fibre; Amplificateur à fibre.*

1. INTRODUCTION

La découverte en 2010 de nouveaux phénomènes d'instabilités modales, appelés en anglais 'Transverse Mode Instabilities' (TMI), explique la limitation de la montée en puissance dans les lasers et les amplificateurs à fibre de fortes puissances utilisant des fibres à large cœur (Large Mode Area, LMA) [1]. Plus généralement, les fibres LMA permettent la propagation de l'énergie au travers de plusieurs modes. Ainsi, un réseau est susceptible d'être généré via des interférences induites par ces différents modes, réseau qui va à son tour entraîner un transfert d'énergie entre les différents modes mis en jeu. En 2016, Ward a démontré analytiquement l'existence de dégradations de la qualité modale dans les fibres qui ne peuvent être expliquées avec les modèles actuels régissant les TMI [2]. Cette étude laisse alors entrevoir l'existence d'un nouveau mécanisme de dégradation modale dans les fibres (FMD, Fiber Mode Degradation). La dynamique d'évolution de ce mécanisme serait intrinsèquement liée à celui du mécanisme de photo-noircissement (PD). L'auteur précise que ce phénomène dépend de surcroît du régime opératoire (continu (CW) ou quasi-continu (QCW)). Dans cet article, nous démontrons pour la première fois une mise en évidence expérimentale de ce nouvel effet.

2. EXPERIENCE

Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 1. L'amplification d'un injecteur (continu ou quasi-continu) à 1064 nm est réalisée via deux étages d'amplification fibrés successifs où le deuxième étage est constitué d'une fibre à cristal photonique (PCF) dopée aux ions ytterbium de 1.8 m de long et possédant un diamètre de cœur de 31 μm (cf. Figure 1). Afin de pouvoir étudier les dynamiques et les seuils d'apparition de ces effets dans la fibre PCF en fonction du régime de fonctionnement, nous utilisons successivement deux oscillateurs différents. Le premier oscillateur, nommé 'Oscillateur pulsé' émet des impulsions de 50 ps à une cadence de 40 MHz tandis que le second, nommé 'Oscillateur continu' est un laser monochromatique possédant une largeur de raie de 1 kHz. Pour les deux configurations, la puissance en sortie du premier étage d'amplification est maintenue constante, de l'ordre de 4 W, ceci afin de garantir les mêmes conditions de saturation du second étage d'amplification. La température externe de la fibre au point d'injection de la pompe est contrôlée à l'aide d'une caméra thermique. Comme la température de la fibre est parfaitement corrélée aux pertes dues au PD, nous avons ainsi directement accès à la dynamique de PD et ceci même en présence de FMD [3]. Une très faible portion du faisceau de sortie est prélevée et filtrée spatialement afin de ne conserver que la fraction de faisceau issu du cœur. Nous sommes donc

capables de quantifier la puissance guidée dans le cœur et de monitorer le seuil d'apparition des FMD, mais également d'étudier leur dynamique. La puissance totale en sortie ainsi que le profil spatial du faisceau sont en permanence enregistrés.

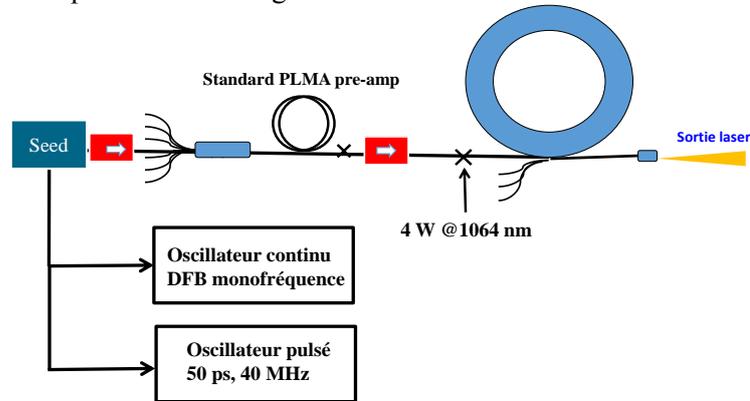


Fig. 1 Schéma du dispositif expérimental

3. RESULTATS

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés sur la Figure 2, qui présente l'évolution temporelle de la fraction de puissance guidée dans le cœur de la fibre PCF (graphique du haut, ligne rouge), la puissance totale en sortie de système (graphique du centre, en bleu) et la température de la fibre (graphique du bas, en orange) durant 500 heures de fonctionnement

Dans un premier temps, nous utilisons l'oscillateur en régime pulsé pendant 90 heures, la puissance de pompe du second étage étant fixée à 180 W (étape A). Nous observons alors une décroissance de la puissance de sortie attribuée aux phénomènes de PD. Comme prévu, ces pertes sont parfaitement corrélées à l'augmentation de la température car dans le même temps, nous observons une augmentation de 4% la température de la fibre [3]. Durant cette même période, le contenu modal de l'amplificateur reste inchangé (à 93%). Une fois que le phénomène de photo-noircissement a atteint un régime stationnaire, nous fixons la puissance de pompe à 215 W pendant 20 heures, ce qui correspond à une puissance totale émise en sortie du système de 150 W en régime pulsé (étape B). En raison des effets quantiques, la température de la fibre passe à 40°C et reste stable durant toute cette période. Nous observons alors une décroissance de la courbe rouge, ce qui signifie que la fraction de puissance dans le cœur diminue. Nous pouvons donc conclure que le seuil d'apparition des FMD a été atteint et qu'un couplage entre le mode de cœur et le mode de gaine a été réalisé. Il est important de rappeler que la dynamique du phénomène que nous observons est totalement différente de celle des TMI 'standards', dynamique qui a lieu sur des échelles de temps de l'ordre de la microseconde [4]. À la fin de l'étape B, plus de 60 % de la puissance est confinée dans le cœur de la fibre. Notons également que cette dégradation modale intervient en dépit d'une faible diminution de la puissance de sortie (baisse de 2 W), indiquant ainsi que l'amplification du mode fondamental reste inchangée. Nous pouvons donc en conclure que le couplage avec les modes de gaine ne se produit qu'en sortie des fibres amplificatrices. La phase C consiste à ramener la puissance de la pompe à sa valeur initiale, à savoir 180 W. Les conditions thermiques et la puissance de sortie reviennent alors à leurs conditions initiales. Ceci indique clairement que le principe de FMD est totalement réversible. Après 387 heures, l'oscillateur pulsé est remplacé par l'oscillateur continu tout en assurant une puissance de pompe constante égale à 180 W pendant 40 heures (phase D). Nous observons alors une augmentation constante de la température (3°C en 20 heures), montrant ainsi que les effets de photo-noircissement induisent des pertes plus importantes en régime continu qu'en régime pulsé. Cette phase indique aussi que les effets FMD présentent la même dynamique d'évolution pour les deux régimes de fonctionnement. Néanmoins, cette étape prouve que le seuil d'apparition des effets FMD est plus bas en régime continu qu'en régime pulsé. De plus, ce seuil d'apparition des régimes FMD est en parfaite corrélation avec les dynamiques de photo-noircissement.

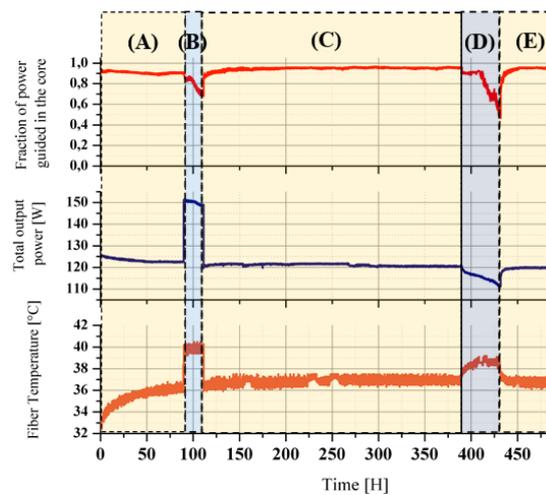


Fig. 2 Fraction de puissance guidée dans le cœur (ligne rouge), puissance totale en sortie (ligne bleue), et température de la fibre en fonction du temps (ligne orange).

Le changement de régime provoque alors une diminution de la puissance, ce qui indique clairement un changement de dynamique du phénomène de photo-noircissement entre les deux régimes. Pour expliquer ces phénomènes, nous supposons que le régime pulsé entraîne un blanchissement partiel des centres colorés (phénomène de photo-blanchiment) et donc la diminution du phénomène de photo-noircissement durant les étapes A, B et C. Afin de confirmer cette hypothèse, nous remplaçons à nouveau le seeder dans notre système (Phase E), (l'oscillateur pulsé remplace l'oscillateur continu à l'instant $t=430H$). Comme prévu, la puissance en sortie du dispositif retrouve la valeur qu'elle avait en fin de l'étape C. Ce résultat confirme donc bien l'hypothèse d'un phénomène de photo-blanchiment en régime pulsé. Il s'agit à notre connaissance de la première démonstration d'un phénomène partiel de photo-blanchiment responsable d'une diminution de l'effet de photo-noircissement dans les fibres PCF dopées ytterbium, repoussant ainsi le seuil d'apparition des FMD dans ce type de fibres. Dans la phase E, la réversibilité de ce phénomène est démontrée.

CONCLUSION

Nous avons démontré expérimentalement l'existence d'un nouveau phénomène de dégradation modale complètement différent des phénomènes TMI standards. Ce phénomène apparaît pour des seuils de puissance plus faibles que ceux des TMI, et s'établit préférentiellement en régime continu. Il s'agit à notre connaissance de la première démonstration expérimentale de la corrélation entre les phénomènes de photo-noircissement et de dégradations modales dans les fibres. Nous avons également mis en évidence un phénomène de photo-blanchiment partiel dans les fibres PCF pour des fonctionnements en régime pulsé. Pour conclure, ce travail offre une véritable 'levée de verrous' pour la montée en puissance dans les lasers et amplificateurs à fibre de fortes puissances car il permet la mise en évidence et la compréhension de nouveaux effets de dégradations modales tout en proposant une voie de réduction de ces effets néfastes via la maîtrise du photo-noircissement.

RÉFÉRENCES

- [1] T. Eidam, C. Wirth, C. Jauregui, F. Stutzki, F. Jansen, H. Otto, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers," *Opt. Express* 19, 13218-13224 (2011).
- [2] B. Ward, "Theory and modeling of photodarkening-induced quasi static degradation in fiber amplifiers," *Opt. Express* 24, 3488-3501 (2016).
- [3] J. Montiel, I. Ponsoda, M. Söderlund, J. Koplów, J. Koponen, and S. Honkanen, "Photodarkening-induced increase of fiber temperature," *Appl. Opt.* 49, 4139-4143 (2010).
- [4] N. Haarlammert, O. de Vries, A. Liem, A. Kliner, T. Peschel, T. Schreiber, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier," *Opt. Express* 20, 13274-13283 (2012).

FIBRES SPECIALES POUR L'ENDOSCOPIE NON-LINEAIRE : FIBRES A CŒUR CREUX ET FIBRES MULTI-CŒURS

A. Kudlinski¹, G. Bouwmans¹, E. R. Andresen¹ et H. Rigneault²

¹ Université Lille 1, IRCICA, Laboratoire PhLAM, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

² Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, UMR 7249, Domaine Universitaire de Saint Jérôme, F-13397 Marseille Cedex 20, France

alexandre.kudlinski@univ-lille1.fr

RÉSUMÉ

Nous présentons quelques avancées récentes concernant le développement de fibres optiques spéciales dédiées à la mise au point de micro-endoscopes non-linéaires. Nous nous focaliserons sur les fibres à cœur creux, ayant permis récemment le développement d'un micro-endoscope à diffusion Raman stimulée, et sur les fibres multi-cœurs, qui permettent la mise au point de micro-endoscopes sans optique distale.

MOTS-CLEFS : *fibres optiques à cœur creux, fibres multi-cœurs, micro-endoscopie non-linéaire.*

1. INTRODUCTION

Les contrastes d'optique non-linéaire comme la diffusion Raman cohérente anti-Stokes (CARS), l'auto-fluorescence à 2 photons (2PAF) ou la génération de second et troisième harmoniques (SHG & THG) permettent d'obtenir des images contrastées sans aucun marqueur. Alors que les avancées durant les quinze dernières années ont été spectaculaires dans le domaine de la microscopie non-linéaire de table, les développements en micro-endoscopie sont plus modestes et présentent des performances inférieures [1]. Ceci est dû à la présence d'une fibre optique entre la source de lumière nécessaire à l'excitation des contrastes non-linéaires et le tissu biologique à analyser d'une part, mais aussi entre le signal non-linéaire émis par le tissu biologique et la chaîne de détection et d'analyse d'autre part. Nous présentons ici deux solutions techniques possibles constituées par les fibres à cœur creux et par les fibres multi-cœurs.

2. CONTEXTE

Il s'agit en effet à réaliser des dispositifs imageurs de petites dimensions mais aussi de délivrer des impulsions ultra-courtes (100 fs – 1 ps) et puissantes (kW) en bout de fibre optique afin d'activer les contrastes non-linéaires des tissus biologiques. Or, les fibres optiques dédiées à la micro-endoscopie non-linéaire doivent être de longueur métrique. Les impulsions courtes sont donc fortement distordues temporellement et spectralement par les effets dispersifs et non-linéaires inhérents à la fibre optique, ce qui rend l'excitation du contraste non-linéaire inefficace. La première contrainte imposée à la fibre optique est donc d'être capable de délivrer des impulsions ultra-courtes et puissantes sans les déformer, par un cœur d'acheminement (zone orange sur la Fig. 1). Une fois l'échantillon illuminé par ces impulsions courtes et le

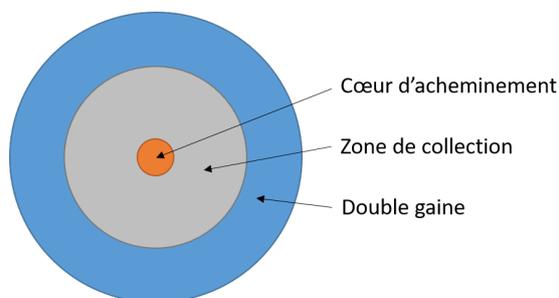


Fig. 1 : Coupe schématique d'une fibre à double gaine utilisée en endoscopie non-linéaire.

contraste non-linéaire activé, la même fibre optique doit être capable de collecter efficacement le faible signal non-linéaire généré (zone grise sur la Fig. 1), puis de l'acheminer en retour vers la chaîne de détection. Cette opération est généralement réalisée à l'aide d'une double gaine, c'est-à-dire qu'une couche de matériau de bas indice (zone bleue sur la Fig. 1) entoure la gaine optique de la fibre, qui joue alors le rôle de cœur de collection.

Nous proposons ici deux solutions à la problématique de l'acheminement d'impulsions ultra-courtes intenses à travers un fibre optique de longueur métrique.

3. RESULTATS : FIBRES A CŒUR CREUX

La première solution repose sur l'emploi de fibres à cœur creux, de type Kagomé [2]. En effet, dans ces fibres, la lumière est guidée à plus de 99% dans le cœur central d'air ce qui réduit de façon spectaculaire la non-linéarité subie par les impulsions courtes, et donc les distorsions spectrales et temporelles. De plus, de par leur mécanisme de guidage [3], ces fibres Kagomé possèdent une dispersion de vitesse de groupe très faible, ce qui permet de s'affranchir des dispositifs de pré-compensation de dispersion chromatique. La figure 2(a) montre une image de fibre Kagomé à double gaine prise au microscope électronique à balayage (MEB). La lumière est acheminée par le cœur creux central, et le signal non-linéaire généré par l'échantillon biologique est collecté par l'anneau de silice entourant la région microstructurée. La double gaine de bas indice est constituée par une couronne périphérique de trous d'air. Les figures 2(b) et (c) montrent respectivement l'évolution de la durée d'impulsion en entrée (trait bleu) et en sortie de fibre (trait vert) mesurée dans 1 m de fibre d'une part, et l'évolution du spectre de l'impulsion en entrée (trait bleu) et en sortie de fibre, pour des puissances croissantes (autres couleurs). Ces résultats montrent que la fibre est capable d'acheminer des impulsions femtoseconde sans distorsions temporelles ou spectrales [4].

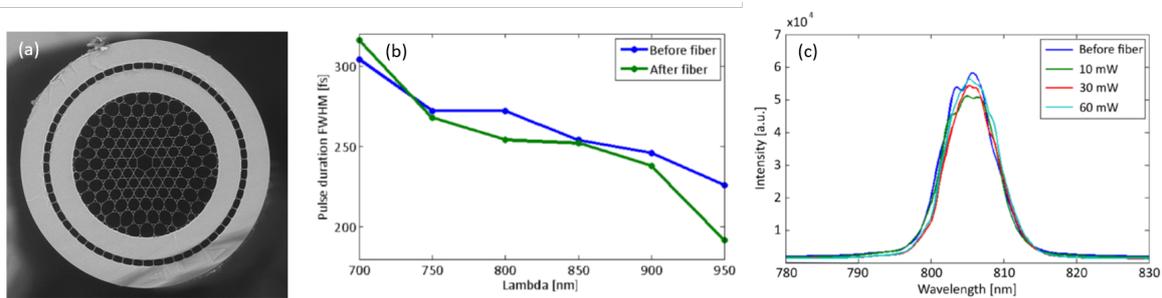


Fig. 1 : (a) Image MEB d'une fibre Kagomé à cœur creux à double gaine. (b) Evolution de la durée d'impulsion en entrée (trait bleu) et en sortie de fibre (trait vert) mesurée dans 1 m de fibre en fonction de la longueur d'onde d'excitation. (c) Evolution du spectre de l'impulsion en entrée (trait bleu) et en sortie de fibre, pour des puissances croissantes (traits vert, rouge et cyan).

4. RESULTATS : FIBRES MULTI-CŒURS

La seconde solution, radicalement différente, repose sur l'emploi de fibres multi-cœurs. L'idée est de minimiser l'impact de la non-linéarité en étalant spatialement l'impulsion incidente sur un nombre élevé de cœurs, ce qui réduit la puissance dans chaque cœur. En sortie de fibre, les impulsions issues de chaque cœur sont recombinaées de façon cohérente pour obtenir une impulsion puissante. En plus, l'emploi d'un modulateur spatial de lumière en entrée de fibre permet de contrôler finement la phase relative dans chaque cœur, ce qui permet un contrôle de l'orientation du front d'onde de l'impulsion recombinaée en sortie. Il est alors possible d'effectuer un balayage du point de focalisation en sortie, et donc de former une image (Fig. 3(b)). Afin d'être compatible avec un micro-endoscope, il est nécessaire, comme pour la fibre à cœur creux, d'avoir une double gaine collectrice pour acheminer signal non-linéaire généré vers la chaîne de détection. La figure 3(a)

montre une photo MEB d'une fibre multi-cœurs à double gaine utilisée dans ce contexte. Chacun des 169 cœurs est composé de silice dopée au germanium (points blancs sur la Fig. 3(a)), et est monomode à la longueur d'onde de travail. Afin de permettre la mise en forme cohérente et le contrôle de l'orientation du front d'onde de l'impulsion de sortie, les cœurs sont suffisamment éloignés pour ne pas être couplés. La double gaine de bas indice permettant la collection du signal non-linéaire est constituée par une couronne périphérique de trous d'air.

Cette fibre a d'ores et déjà permis la démonstration d'imagerie à 2 photons sans optique distale [5]. Les améliorations ultérieures [6,7] seront présentées lors de la conférence.

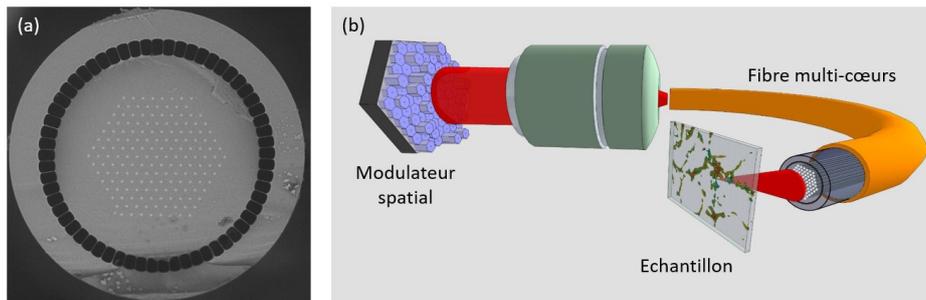


Fig. 3 : (a) Image MEB d'une fibre multi-cœurs à double gaine. (b) Schéma de principe de l'imagerie endoscopique sans optique distale.

CONCLUSION

Nous présentons deux solutions quant au développement de fibres optiques spéciales dédiées à la micro-endoscopie non-linéaire: les fibres à cœur creux de type Kagomé et les fibres multi-cœurs. Les avantages et inconvénients de chacune seront discutés lors de la conférence, et les améliorations récentes seront abordées.

RÉFÉRENCES

- [1] S. F. Elahi and T. D. Wang, "Future and advances in endoscopy," *J. Biophotonics* **4**, 471–481 (2011).
- [2] F. Couny, F. Benabid, and P. S. Light, "Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* **31**, 3574–3576 (2006).
- [3] F. Couny, F. Benabid, P. J. Roberts, P. S. Light, and M. G. Raymer, "Generation and Photonic Guidance of Multi-Octave Optical-Frequency Combs," *Science* **318**, 1118–1121 (2007).
- [4] A. Lombardini, E. R. Andresen, A. Kudlinski, I. Rimke, and H. Rigneault, "Origin and suppression of parasitic signals in Kagomé lattice hollow core fibers used for SRS microscopy and endoscopy," *Opt. Lett.* **42**, 1824–1827 (2017).
- [5] E. R. Andresen, G. Bouwmans, S. Monneret, and H. Rigneault, "Two-photon lensless endoscope," *Opt. Express* **21**, 20713–20721 (2013).
- [6] S. Sivankutty, V. Tsvirkun, G. Bouwmans, D. Kogan, D. Oron, E. R. Andresen, and H. Rigneault, "Extended field-of-view in a lensless endoscope using an aperiodic multicore fiber," *Opt. Lett.* **41**, 3531–3534 (2016).
- [7] E. R. Andresen, S. Sivankutty, V. Tsvirkun, G. Bouwmans, and H. Rigneault, "Ultrathin endoscopes based on multicore fibers and adaptive optics: a status review and perspectives," *J. Biomed. Opt.* **21**, 121506–121506 (2016).

DEVELOPPEMENTS RECENTS DE FIBRES A CŒUR CREUX A COUPLAGE INHIBE

M. Chafer^{1,2}, M. Maurel^{1,2}, A. Amsanpally¹, A. Gorse², B. Beaudou², J.M. Blondy¹, B. Debord^{1,2}, F. Gérôme^{1,2}, F. Benabid^{1,2}

¹ GPPMM, Institut de recherche Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 87060 Limoges, France

² GLOphotonics SAS, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

matthieu.chafer@xlim.fr, f.benabid@xlim.fr

Différentes structures de fibres creuses guidant par couplage inhibé avec des pertes record de 7,7dB/km à 780nm et de 8,5dB/km à 1µm sont présentées.

MOTS-CLEFS : *fibre à cœur creux à cristal photonique; couplage inhibé.*

1. INTRODUCTION

Les années 2000 ont connu un tournant dans le domaine des fibres à cœur creux. Ces guides d'onde dont le principe de guidage optique était jusque-là dicté par le principe de bande interdite photonique, a vu émerger une nouvelle fibre creuse dite à gaine Kagomé [1]. Son principe de guidage repose sur le couplage inhibé modélisé pour la première fois en 2007 [2]. Ce modèle a alors permis l'introduction en 2010 d'un contour de cœur hypocycloïdal, ou à courbure négative, permettant d'atteindre des pertes de transmission beaucoup plus basses qu'auparavant [3]. Ceci est illustré par la valeur record de 17 dB/km à 1 µm [4] reportée en 2013. En 2014, ces mêmes fibres ont été utilisées dans le transfert de faisceaux ultra-courts et de forte énergie avec une démonstration de déport d'impulsions de 1 mJ et de 600 fs [5].

Il est à souligner que ces performances record de guidage sont obtenues sur des bandes de transmission relativement étroites (environ 50 nm de largeur) qui ne permettent pas de répondre en l'état aux nouvelles applications naissantes. Une des solutions repose sur la fabrication de fibres présentant des épaisseurs t de ponts silice, du contour du cœur creux, affinées afin de travailler sur des bandes d'ordre moins élevées et donc élargies. Cependant, la rhéologie du matériau silice rend difficile une telle fabrication tout en conservant une courbure négative (quantifiée par un paramètre noté b [4]) du contour du cœur suffisante, deux conditions essentielles à l'inhibition de couplage entre le mode de cœur et les modes de gaine de silice.

Après un bref rappel du principe de guidage par couplage inhibé et des principales règles pour un guidage performant, un travail expérimental d'optimisation des paramètres t et b est proposé fixant un nouvel état de l'art des fibres creuses Kagomé ayant des pertes linéiques passant pour la première fois sous la barre des 10 dB/km. En parallèle, les concepts et règles de guidage de cette fibre ont permis de développer de nouvelles structures dites "tubulaire" permettant d'exacerber le mécanisme de couplage inhibé. Elles sont basées sur un anneau de tubes de silice également espacés. Elles ont été étudiées théoriquement puis fabriquées [6]. Les résultats sont présentés en deuxième partie avec la réalisation d'une fibre tubulaire démontrant des pertes de transmission record de 7,7 dB/km à 750 nm et une seconde ayant une transmission ultra-large avec des atténuations linéiques comprises entre 10 et 20 dB/km de 600 à 1200 nm.

2. GUIDAGE PAR COUPLAGE INHIBE ET REGLES D'OPTIMISATION

Le guidage par couplage inhibé dans les fibres creuses repose sur un mécanisme de réduction du couplage des modes de cœur avec le continuum de modes de gaine. Ce modèle trouve une analogie entre les états liés et/ou quasi liés dans un continuum proposé en 1929 par Van Neumann et Wigner [7]. L'inhibition de couplage dans ces fibres revient à réduire très fortement le produit scalaire (qu'il tende vers 0) entre le champ du mode de cœur $\varphi_{cœur}$ et le mode de gaine φ_{gaine} *i.e.* $\langle \varphi_{gaine} | \Delta n | \varphi_{cœur} \rangle \rightarrow 0$, où Δn est le profil d'indice transverse de la structure photonique. Pour cela il

faut introduire une incompatibilité de symétrie, c'est-à-dire un fort désaccord de phase entre les composantes transverses du vecteur d'onde des modes de cœur et de gaine, et/ou un recouvrement spatial minimal entre les champs. Le mode fondamental de cœur ayant une phase transverse très lente, il convient alors que la phase transverse des modes de gaines soit très rapide. Il a ainsi été montré que l'inhibition de couplage pouvait être exacerbée en ayant une structure de gaine avec des ponts de silice très fins et les plus longs possible, et ne présentant pas de nœuds de silice. En effet, le produit scalaire précédant montre une proportionnalité avec un paramètre clé qui est le nombre azimutal des modes de gaine noté m . Ce nombre m peut être défini par l'équation suivante : $m = n_{eff}(U/\lambda) \cdot (1 - \pi \cdot t/l)$ où l et t sont respectivement le périmètre du contour du cœur et l'épaisseur des ponts de silice. Il ressort de cette équation l'intérêt de travailler avec une structure de fibre présentant un contour de cœur hypocycloïdal avec des ponts les plus fins possibles.

3. FIBRE A CŒUR CREUX KAGOME

Nous présentons ici une étude expérimentale de fabrication de fibres Kagomé avec différentes épaisseurs de ponts de silice variant de 800 nm à 300 nm par pas de 100 nm, ayant pour effet principal de décaler les bandes de transmission d'ordre élevé vers le bleu et ainsi augmenter leur largeur spectrale dans le domaine d'étude fixé. Une attention particulière a été portée pour conserver une courbure d'arches la plus prononcée possible sans déformer le reste de la structure. Sur la Fig. 1 a) il ressort, par limitations rhéologiques, que la diminution de l'épaisseur des ponts implique une diminution du b , allant d'un b de 0,95 pour $t=800$ nm à un b de 0,45 pour $t=300$ nm. Ceci est également illustré par les différentes images MEB des contours de cœur des fibres fabriquées ainsi que les mesures de pertes par cut-back (faites sur des longueurs > 100 m).

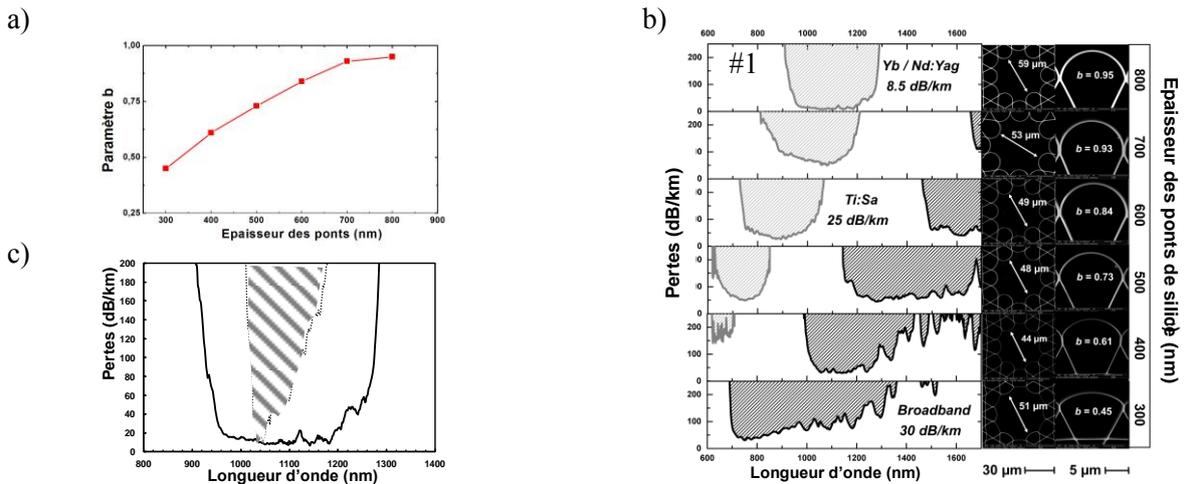


Fig. 1 : a) Evolution du b en fonction de l'épaisseur de la silice. b) Evolution des pertes en fonction de la longueur d'onde pour différentes fibre Kagomé avec différentes épaisseurs de ponts de silice. c) Comparaison des spectres de pertes de la fibre#1 avec le précédent état de l'art [4].

Ainsi, la bande fondamentale de transmission voit progressivement son minimum de pertes se décaler de 1600 nm (pour $t=600$ nm) à 780 nm (pour $t=300$ nm) avec des valeurs respectivement de 50 dB/km à 30 dB/km. Nous pouvons cependant constater qu'à des longueurs d'ondes inférieures à 1 μm les pertes re-augmentent contrairement à ce que la théorie prévoit, conséquence de pertes par diffusion due à la rugosité de surface. Ceci est particulièrement visible pour une épaisseur de 410 nm où les pertes atteignent une valeur de 180 dB/km. La fibre notée #1 se distingue par ses pertes de transmission record absolue pour une fibre Kagomé avec 8,5 dB/km. La Fig. 1c) montre à titre de comparaison la courbe de pertes de la fibre #1 superposée à celle de la fibre du précédent état de l'art avec 17 dB/km [4] (courbe hachurée) où on peut noter que la largeur de bande à mi-hauteur a été doublée pour atteindre 225 nm.

Malgré ces résultats, un point limitant de la structure Kagomé se focalise sur la présence de nœuds de silice le long du contour du cœur. La forme hypocycloïdale permet d'en limiter les inconvénients en terme du couplage du mode de cœur et des modes résidants dans ces plots de silice et donc en terme de pertes. Cependant, une structure idéale serait une fibre rassemblant à la fois un contour à courbure négative sans nœuds de silice. Celle-ci, appelée "tubulaire", a été étudiée théoriquement et expérimentalement et fait l'objet de travaux présentés dans la section suivante.

4. FIBRE CREUSE A CRISTAL PHOTONIQUE TUBULAIRE

Une étude expérimentale et théorique a été menée sur la fabrication de telles fibres creuses tubulaires [6]. Cette étude révèle une forte dépendance sur la figure de pertes des paramètres physiques suivant: nombre de tubes, taille des tubes et espacement entre ceux-ci. Il ressort que 8 tubes est un arrangement optimum et qu'un compromis est à trouver en terme d'espacement de ces derniers. Les Fig. 3 a) et d) montrent deux images MEB de fibres ainsi fabriquées avec des rayons de cœur $20\ \mu\text{m}$ et un diamètre extérieur de $260\ \mu\text{m}$. Les courbes de transmission pour une longueur de fibre de 10 m sont représentées sur la Fig. 3 b) et e). La première fibre (notée A) montre des pertes de transmission record de $7,7\ \text{dB/km}$ à $750\ \text{nm}$. La seconde fibre (notée B) présente des ponts de silice affinés à $227\ \text{nm}$ décalant la bande de transmission fondamentale vers $515\ \text{nm}$, avec des pertes comprises entre 10 et $20\ \text{dB/km}$ sur plus d'une octave. Enfin, des études complémentaires ont permis de démontrer dans les deux cas un guidage UV jusqu'à $220\ \text{nm}$.

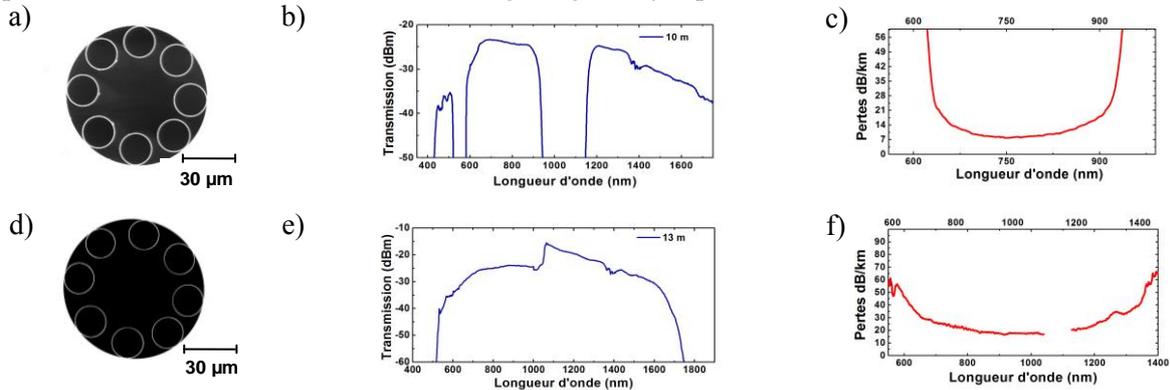


Fig. 3 : Fibre A : a) Image MEB, b) Spectre de transmission mesurée sur une longueur de 10 m et (c) zoom sur le niveau de pertes record. Fibre B : d) Image MEB, e) Spectre de transmission sur une longueur mesurée de 13 m et f) zoom sur le niveau de pertes record.

CONCLUSION

Nous avons vu qu'en jouant sur les règles de guidage par couplage inhibé, des pertes record en dessous de $10\ \text{dB/km}$ ont été atteintes pour une fibre Kagomé et une fibre tubulaire ainsi que des bandes de transmissions élargies à plus d'une octave en conservant des valeurs comprises entre 10 et $20\ \text{dB/km}$.

Remerciements : Les auteurs remercient la plateforme PLATINOM pour la fabrication de fibres, le projet européen Hiperdias et l'Agence Nationale de la Recherche/DGA pour le projet Maturation.

REFERENCES

- [1] F. Benabid *et al.*, Science, vol. 298, pp.399-402, 2002.
- [2] F. Couny *et al.*, Science, vol. 318, pp.1118-1121, 2007.
- [3] Y. Y. Wang *et al.*, Optics Letters, vol. 36, Bell. Syst. Tech. J., vol. 52, p.669, 2011.
- [4] B. Debord *et al.*, Optics Express, vol. 21, N°23, 2013.
- [5] B. Debord *et al.*, Optics Express, vol. 4, N°2, 2017.
- [6] B. Debord *et al.*, Optica, vol. 22, N°9, 2014.
- [7] J. von Neumann *et al.*, Phys. Z. 30, 465-467 (1929).

EMISSION PLASMA UV-DUV AU SEIN D'UNE FIBRE CREUSE

F. Delahaye¹, F. Amrani¹, B. Debord^{1,2}, F. Gérôme^{1,2}, and F. Benabid¹

¹ GPPMM, Institut de recherche Xlim, UMR CNRS 7252, Université de Limoges, 87060 Limoges, France

² GLOphotonics S.A.S, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France

frederic.delahaye@xlim.fr

RÉSUMÉ

Nous reportons l'émission UV-DUV de micro-plasma dans des fibres creuses par excitation non-intrusive, et leurs perspectives pour le développement de lasers ultraviolet compacts et accordables.

MOTS-CLEFS : *micro-plasmas, excitateur microonde, source UV.*

1. INTRODUCTION

Depuis ces dernières années, les fibres à cristaux photonique à cœur creux (HC-PCF) se sont imposées progressivement en tant que plateforme ultra performante pour le confinement et le guidage de la lumière. Plus récemment, l'utilisation de ces fibres avec l'insertion d'un gaz au sein du cœur a été étendue aux gaz ionisés en générant et confinant un micro-plasma par une excitation microonde non intrusive. Le rayonnement lumineux émis a alors pu être guidé au sein de la fibre. L'étude de tels micro-plasmas a alors démontré des taux d'ionisation importants de l'ordre de $5.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ pour des pressions basses de quelque mbar. Aussi, selon le gaz retenu, le plasma généré permet une émission directe dans le domaine ultraviolet (UV) voire profond UV (DUV) ce qui lui confère un fort potentiel pour la réalisation de sources laser innovantes dans cette gamme spectrale difficilement accessible actuellement. Dans cette communication, nous présentons le progrès réalisé dans la miniaturisation des excitateurs microondes utilisés pour l'amorçage de micro-plasmas aux seins de ces fibres. Grâce à une technologie planaire une miniaturisation atteignant un facteur 50 en épaisseur a été accomplie. Aussi, nous présentons une étude sur l'optimisation de l'émission du plasma vers les basses longueurs d'onde du UV-DUV, où par un contrôle du ratio d'un mélange ternaire du gaz Ar-N₂-O₂, une émission s'étendant jusqu'à 220 nm a été démontrée. Enfin, nous présentons l'intégration de ce micro-plasma dans un dispositif d'accordabilité de type Littrow, et démontrons une source fluorescente UV accordable sur gamme spectrale allant de 300 nm à 350 nm.

2. GENERATION NON-INTRUSIVE DE PLASMA DANS DES FIBRES CREUSES

Le principe physique de l'amorçage d'un plasma au sein des fibres à cœur creux est schématisé en Fig. 1(a). La HC-PCF est remplie d'un gaz rare, ici de l'argon, puis insérée au sein d'une cavité résonante microonde appelée Surfatron (pour plus de détails voir ref. [1]). Le surfatron est conçu selon le modèle d'un coaxial avec une âme centrale qui va guider l'onde électromagnétique et d'un plan de masse, la paroi extérieure. En bout de l'âme centrale se trouve un gap d'air qui va permettre de localiser une forte densité de champ qui sera couplée avec une efficacité supérieure à 90% à la fibre. Dans ces conditions, la génération d'une colonne de plasma stable au sein de la fibre devient possible, reposant sur l'excitation d'une onde de surface auto-guidante, similaire à une onde plasmonique. La propagation de cette onde est localisée à l'interface entre le cœur de la fibre rempli d'argon et la paroi silice de la gaine. Du fait de la création d'un fort champ électrostatique, les particules qui constituent le plasma vont subir un arrangement particulier, notamment une barrière de diélectrique sera formée qui « protégera » la fibre de la chaleur intense du plasma tout en le confinant. En effet, le plasma ayant une température de l'ordre de 1300 K, la structure de la fibre pourrait être endommagée. L'arrangement des particules crée de ce fait un gradient de température entre le centre du plasma et le bord de la silice, préservant intacte la structure de gaine. Enfin, la concentration électronique du plasma est très élevée de l'ordre de $5.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à une pression relativement basse de 1 mbar. Il est aussi à noter que le surfatron qui repose sur une cavité résonante cylindrique volumique conçu avec des dimensions optimisées pour une fréquence de résonance à 2,45 GHz présente un inconvénient qui est sa taille de 11 cm x 6 cm (fig.1 (c)). Les travaux de F. Vial *et al* ont montré le potentiel d'un nouveau type d'excitateur basé sur la

technologie planaire appelé ligne microstrip [2]. Cette technologie permet de réaliser des excitateurs beaucoup plus compacts contrairement à la technologie précédente (Fig. 1(d)). Les lignes microstrips sont conçues sur une plaque de diélectrique recouverte de deux couches de cuivre. Une des deux couches de cuivre va servir de plan de masse et la seconde va être gravée pour former l'excitateur microstrip. Sur ce type d'excitateur, nous avons fait un travail d'optimisation des dimensions pour maximiser le transfert d'énergie c'est à dire obtenir la colonne plasma la plus longue possible. Les dimensions de l'excitateurs optimisés sont alors : longueur de 4 cm pour une largeur de 3 cm et une épaisseur de 0,2 cm. L'autre avantage de ces excitateurs concerne la faible puissance microonde utilisée pour générer une colonne de plasma qui est réduite à quelques Watt seulement en comparaison des 35 W du surfatron. Ce système d'excitation compact présente de réelles perspectives pour la conception de sources ultra-compactes.

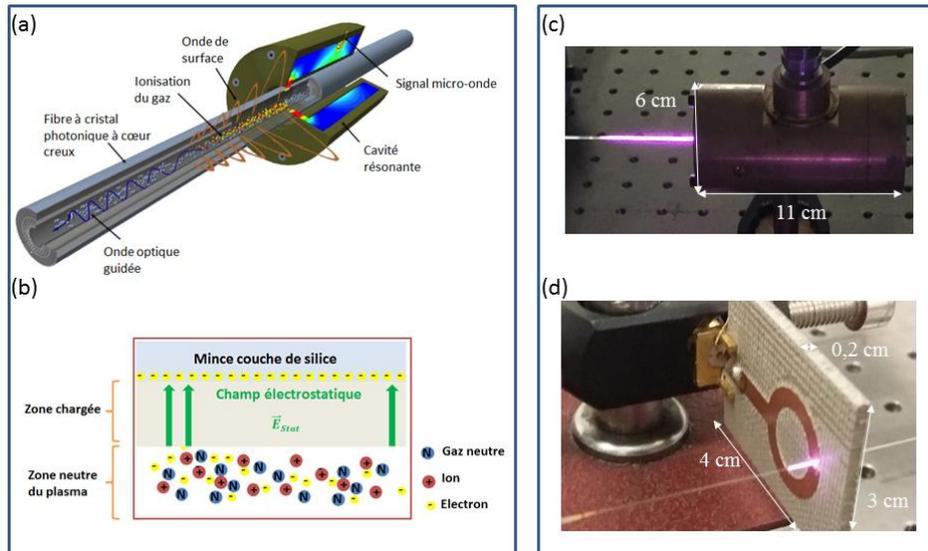


Fig.1: (a) Schéma de principe illustrant l'excitateur surfatron traversé par une fibre HC-PCF avec la propagation de l'onde de surface associée. (b) Arrangement des particules au sein de la fibre sous l'action d'un champ électrostatique. (c) Génération d'une colonne de plasma pour le cas d'un excitateur volumique (surfatron) et (d) planaire (ligne microstrip).

3. OPTIMISATION ET ACCORDABILITE DE L'EMISSION LUMINEUSE DU PLASMA POUR LE DOMAINE UV-DUV

Les résultats obtenus jusqu'à présent reposaient sur la génération d'un micro-plasma à base d'argon. Cependant, ce gaz seul ne permet pas d'obtenir une large émission spectrale dans le domaine UV-DUV visé. La figure 2(a) présente un spectre d'émission classique d'un plasma d'argon qui se trouve limité à 400 nm dont les raies principales correspondent à celles de l'ion de Ar^+ ($Ar II$). La solution proposée dans cette communication pour descendre en dessous de cette région spectrale consiste à utiliser un mélange de gaz. Ainsi, notre choix s'est porté sur un mélange ternaire de gaz d'argon, d'azote et d'oxygène ($Ar-N_2-O_2$). En effet, l'azote et l'oxygène associés, permettent une émission lumineuse là où l'argon ne présente pas de raies d'émission. Par une étude systématique, nous avons alors déterminé les ratios les plus judicieux. L'azote et l'oxygène sont donc progressivement ajoutés pour améliorer la fluorescence dans le UV-DUV. Ces manipulations ont été menées à une basse pression de 1 mbar et pour une puissance microonde de 35 W au sein d'une fibre HC-PCF de 117 μm de cœur. A noter que cette fibre a été sélectionnée pour ses bandes de transmissions qui sont positionnées en accord avec l'émission du plasma généré comme le montre la Fig. 2(b). La figure 2(a) résume les résultats mesurés en sortie de fibre sur la plage 200-450 nm pour différents ratio du mélange de gaz. On note que dès l'ajout de l'azote et de l'oxygène à l'argon, une forte émission entre 275 et 400 nm apparaît correspondant à la signature spectrale de l'émission du deuxième système positif de l'azote. Une émission significative dans le DUV (200 à 275 nm) est aussi présente qui résulte de la désexcitation du métastable monoxyde d'azote NO. Pour les conditions expérimentales fixées ci-dessus, l'optimum du ratio de gaz trouvé est de 90% d'argon, 5% d'azote et 5% d'oxygène.

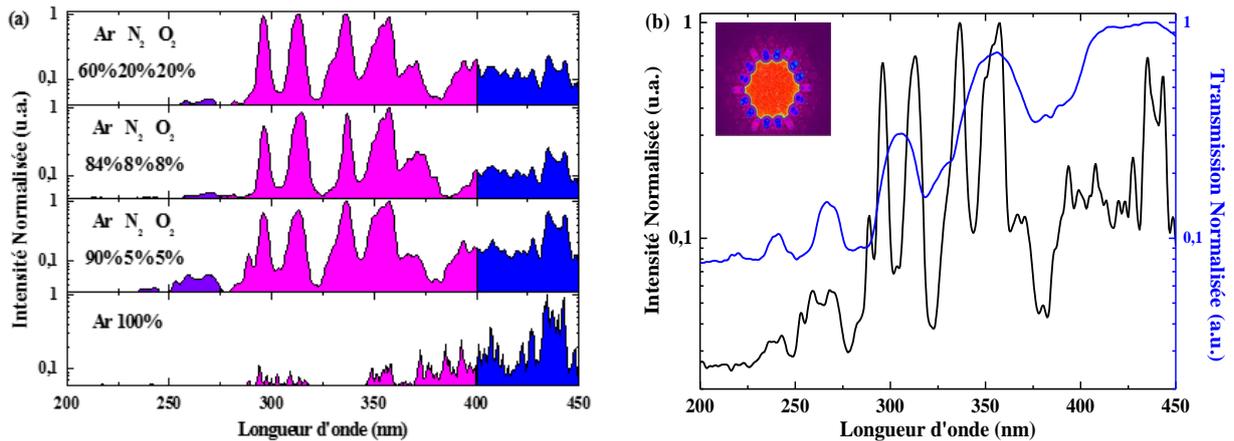


Figure 2 : (a) Evolution du spectre mesuré en sortie de fibre pour différents ratios du mélange Ar/O₂/N₂. (b) Transmission de la fibre utilisée (courbe bleu) et spectre correspondant pour l'optimum Ar 90% - N₂ 5% - O₂ 5% (courbe noire). En insert, image du champ proche prise en sortie de fibre.

Fort de ces résultats, un réseau blasé optimisé sur l'ordre 1 fonctionnant sur la plage 300-350 nm a été ajouté en sortie de fibre afin d'accorder la source en longueur d'onde (voir figure 3(a)). Dans cette configuration, la raie souhaitée est sélectionnée par la rotation du réseau blasé permettant l'obtention d'une source fluorescente accordable dans le domaine UV-DUV comme le montre la figure 3(b).

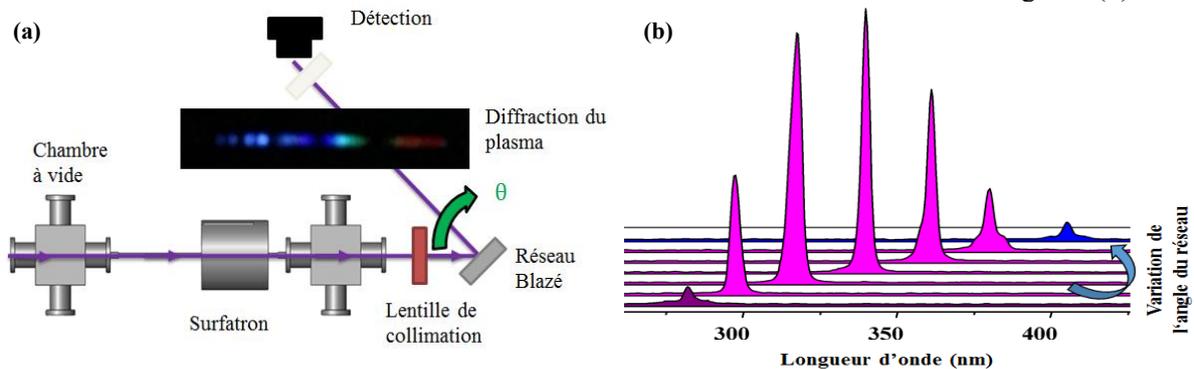


Figure 3 : (a) Schéma du dispositif expérimental de la source accordable. (b) Emission spectrale mesurée en sortie du réseau pour différent angle.

CONCLUSION

La génération et le confinement de micro-plasma par une excitation microonde non intrusive a été démontrée dans les fibres creuses Kagomé à cristal photonique. La conception et la réalisation d'une seconde génération d'excitateurs basés sur la technologie des lignes microstrips a été menée afin de répondre à l'aspect compact et portatif. De même, afin d'étendre l'émission lumineuse du plasma aux courtes longueurs d'onde du UV-DUV, une étude a été faite sur l'utilisation de mélange de gaz, démontrant un optimum pour le ratio 90% d'argon, 5% d'oxygène et 5% d'azote. Finalement, l'ajout d'une configuration avec un réseau blasé a permis de démontrer une sélection spatiale des raies diffractées à l'ordre 1 du réseau sur la gamme 300-350 nm.

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR Maturation) et la DGA pour leur aide financière qui contribue à l'avancement de nos projets.

REFERENCES

- [1] B. Debord, R. Jamier, F. Gérôme, O. Leroy, C. Boisse-Laporte, P. Leprince, L. L. Alves, and F. Benabid, "Generation and confinement of microwave gas-plasma in photonic dielectric microstructure," *Optics Express*, vol. 12, pp. 25509–25516, 2013.
- [2] F. Vial, K. Gadonna, B. Debord, F. Delahaye, F. Amrani, O. Leroy, F. Gérôme, and F. Benabid, "Generation of surface-wave microwave microplasmas in hollow-core photonic crystal fiber based on a split-ring resonator," *Optics Letters*, Vol. 41, pp. 2286-2289, 2016.