NOUVELLES ARCHITECTURES DE FIBRES OPTIQUES A TRES LARGE AIRE MODALE POUR LA MONTEE EN PUISSANCE DES LASERS FIBRES

Aurélien Benoît[1,2], Dia Darwich[1], Romain Dauliat[3], Raphaël Jamier[1], Georges Humbert[1], Stephan Grimm[3], Kay Schuster[3], François Salin[2] et Philippe Roy[1]

[1] *Laboratoire Xlim, UMR CNRS/Université de Limoges 7252, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France*

[2] *Eolite Systems, 11 avenue de la Canteranne, 33600 Pessac, France*

[3] *Institute of Photonic Technology, Albert-Einstein-Straβe 9, 07745 Jena, Germany*

aurelien.benoit@xlim.fr

RÉSUMÉ

Nous rapportons ici la première démonstration expérimentale d'une nouvelle architecture de fibres optiques à très grande surface de mode destinée à renforcer la propagation d'un mode transverse unique. L'originalité de ce travail repose sur une rupture contrôlée de la périodicité de la gaine optique microstructurée afin de favoriser la délocalisation des modes d'ordre supérieur au bénéfice du confinement du seul mode fondamental. Le caractère monomode des structures fabriquées a été conforté en utilisant un interféromètre à faible cohérence. Comme prédit lors d'une approche numérique préliminaire, un tel comportement est mis en évidence sur une large bande spectrale allant de 1 à 2 µm et ce pour des diamètres de cœur allant de 30 à 140 µm.

MOTS-CLEFS : *Fibres microstructurées ; propagation monomode ; laser de puissance*

1. CONTEXTE

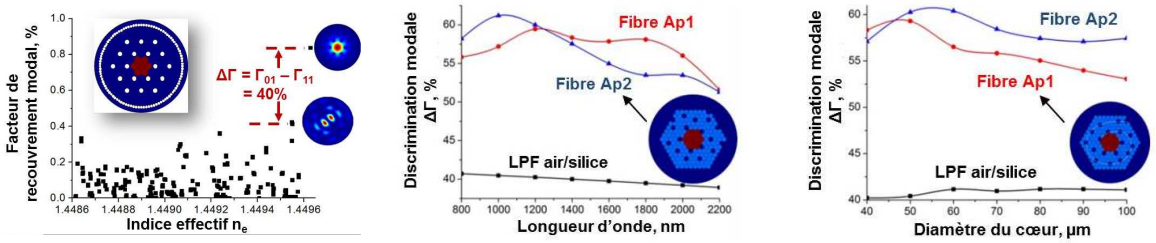
La montée en puissance moyenne extraite des lasers à fibres au cours de la dernière décennie s'est fortement appuyée sur un travail considérable lié au développement et à l'optimisation des guides d'onde fibrés. Des puissances moyennes record de l'ordre de 10kW ont ainsi pu être obtenues en régime continu [1]. Bien que les fibres à très large aire modale ($D_{cœur}$ > 50µm) apparues ces dernières années (« leakage channel fibres » [2], « large pitch fibres » [3]…) permettent de repousser efficacement les seuils d'apparition des processus non linéaires, l'augmentation significative de la dimension des cœurs se heurte aujourd'hui à de nouvelles limitations appelées instabilités modales. Ces dernières se traduisent par une dégradation de la qualité spatiale du mode émis liée à une fluctuation temporelle entre le mode fondamental et un ou plusieurs modes d'ordre élevé reconfinés dans le cœur du fait de la charge thermique accumulée. Ces instabilités modales apparaissent au-delà d'une certaine puissance moyenne extraite. Une solution permettant de repousser ce seuil est de travailler sur les propriétés de confinement du guide d'onde pour accroitre la délocalisation des modes d'ordre élevé hors du cœur de la fibre tout en conservant un fort confinement du mode fondamental.

Nous présentons dans cet article une étude expérimentale menée sur une nouvelle architecture de fibres optiques basées sur une rupture de la périodicité de la gaine optique microstructurée permettant de valider leur propriété de guidage. L'objectif du travail mené est de contrôler la qualité intrinsèque du guide d'onde à ne guider que le seul mode fondamental.

2. MODELE NUMERIQUE

Nous avons arbitrairement choisi comme référence pour notre étude numérique les fibres dites « Large Pitch Fibres » constituant l'état de l'art actuel des fibres à très large aire modale. La qualité du guide d'onde peut alors être déterminée par la discrimination modale $\Delta\Gamma$, paramètre calculé comme étant la différence entre les facteurs de recouvrement avec le milieu à gain du mode fondamental et du mode d'ordre élevé le mieux confiné par la structure [4]. La figure 1.a montre à titre d'exemple le facteur de recouvrement calculé pour les 300 premiers modes guidés dans la fibre LPF air/silice [3] choisie comme référence (A_{eff} = 2500 µm^2) pour une longueur d'onde de travail λ = 1 µm. On constate clairement que la discrimination modale vaut $\Delta\Gamma$ = 40% dans ce cas. Les structures que nous explorons sont des fibres toutes solides pour lesquelles la gaine microstructurée

est basée sur l'insertion d'inclusions bas-indice dans un matériau homogène d'indice haut. Nous avons déjà montré qu'une rupture de symétrie appliquée de manière contrôlée dans la microstructure de la gaine optique permet alors de renforcer le caractère monomode du guide d'onde en augmentant de manière significative la discrimination modale [4]. Deux structures de fibres apériodiques ont été récemment proposées (nommées fibre Ap1 et fibre Ap2 dans la suite), leur section transverse étant montrée sur la figure 1. La figure 1.b (respectivement figure 1.c) compare l'évolution de la discrimination modale ΔΓ en fonction de la longueur d'onde de travail (respectivement du diamètre du cœur) des deux structures apériodiques proposées avec celle de la fibre choisie comme référence. Les figures 1.b et 1.c mettent en évidence le bénéfice des deux structures apériodiques sur l'augmentation de la discrimination modale qui passe de 40% à 55%.

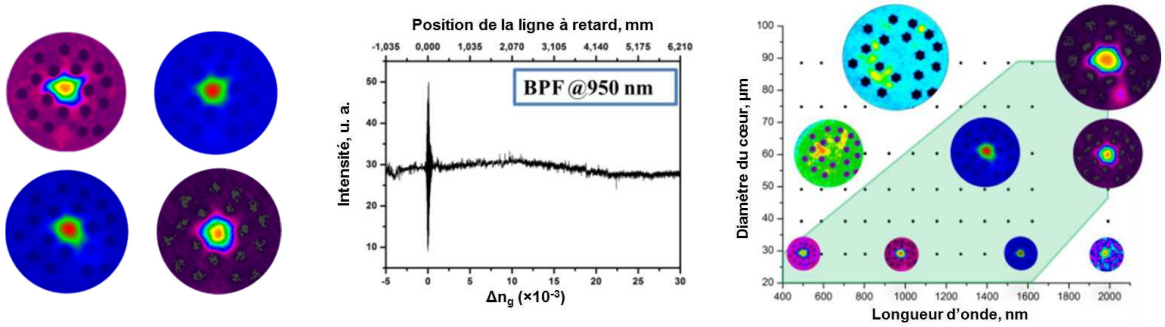


(a) (b) (c)

Fig. 1 : (a) Calcul du facteur de recouvrement avec le milieu à gain des 300 premiers modes guidés dans la fibre LPF air/silice choisie comme référence et présentée dans la publication [3]. (b-c) Comparaison entre l'évolution de la discrimination modale en fonction de la longueur d'onde de travail (A_{eff} fixée à 2500 µm^2) et du diamètre du cœur (λ fixée à 1 µm) pour la fibre de référence et les deux structures apériodiques proposées. Insert : section transverse des fibres modélisées.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La plupart du temps, les fibres à très large aire modale sont basées sur des guides d'onde faiblement multimode et le comportement unimodal observé en sortie de fibre est fortement aidé par un filtrage modal sélectif par le gain. Afin d'étudier et de valider expérimentalement les propriétés de guidage de nos deux structures apériodiques, nous avons donc fabriqué des fibres passives. Les étapes de fabrication ainsi que les matériaux choisis seront présentés lors de la conférence. Il est à noter que pour s'astreindre des effets de courbures, nous avons fabriqué des fibres dite « rod-type » (diamètre externe ~ 1 mm). Nous avons observé le champ proche mesuré à l'aide d'une caméra CCD en sortie de tronçons (de longueur égale à 40 cm) de nos deux fibres apériodiques. Pour ce faire, nous avons utilisé deux sources laser différentes : une source supercontinuum associée à des filtres passe-bande et un laser fibré à 2 µm (basée sur une fibre dopée thulium). L'injection dans nos fibres sous test se fait en couplage direct avec la sortie fibrée des sources lasers utilisées. Il est important de souligner ici la forte désadaptation entre les caractéristiques opto-géométriques des



(a) (b) (c)

Fig. 2 : (a) Observation du champ proche en sortie de la fibre Ap1 ($D_{cœur}$ ~ 60 µm) pour λ=1 µm, λ=1,2 µm, λ=1,4 µm et λ=2 µm. (b) Interférogramme mesurée à l'aide d'un interféromètre à faible cohérence en utilisant un filtre passe-bande à λ=0,95 µm. (c) Représentation de la distribution d'intensité mesurée en champ proche en sortie de différentes fibres Ap1 en fonction du diamètre du cœur et de la longueur d'onde de travail. La zone verte représente la zone de fonctionnement monomode.

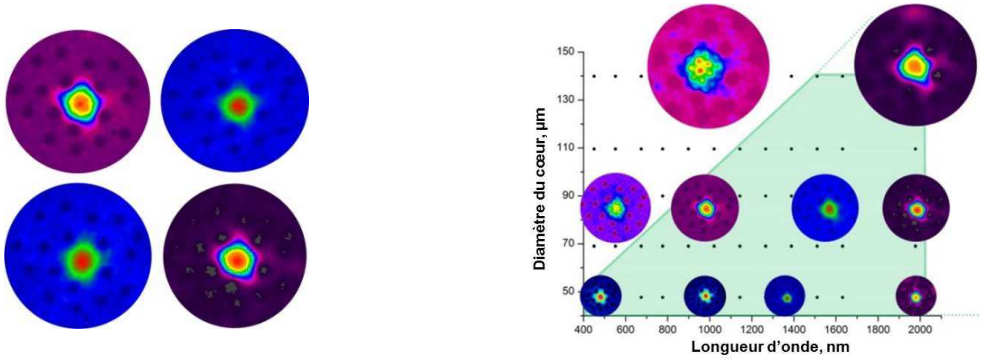
fibres de sortie des sources laser utilisées ($D_{cœur}$ ~ 8 µm) et celles de nos fibres apériodiques sous test (le diamètre de cœur, l'ouverture numérique et le contenu modal sont très différents). On assure ainsi une excitation non sélective du mode fondamental dans les fibres apériodiques sous test. La figure 2.a présente les distributions d'intensité mesurées en champ proche en sortie de la fibre Ap1 ($D_{cœur}$ ~ 60 µm) pour des longueurs d'onde de 1 µm, 1,2 µm, 1,4 µm et 2 µm. Même en modifiant les conditions d'injection dans la fibre apériodique sous test (déplacement dans un plan transverse

de la fibre de sortie de la source laser), seule la propagation du mode fondamental est observée. Le guide d'onde permet ainsi une forte délocalisation des modes d'ordre élevé hors du cœur.

On s'est ensuite attaché à mesurer l'indice de groupe relatif des différents modes susceptibles d'être excités dans cette fibre Ap1 à l'aide d'un interféromètre à faible cohérence [5]. La figure 2.b montre l'interférogramme mesuré à l'aide d'un filtre passe-bande à 950 nm. La présence d'un seul et unique pic d'interférence confirme le caractère monomode de cette structure et donc la délocalisation des modes d'ordre supérieur hors du cœur.

Lors de l'étirage des deux préformes de nos structures apériodiques, nous avons fait varier le diamètre externe des fibres de manière à avoir plusieurs tronçons avec des diamètres de cœur différents et ainsi à pouvoir étudier l'évolution du comportement modal du guide d'onde. La figure 2.c présente une synthèse de l'ensemble des mesures effectuées en champ proche sur les fibres Ap1 pour des tailles de cœur allant de 30 à 90 µm et pour différentes longueurs d'onde de travail. Ces mesures nous ont permis de définir une zone de fonctionnement optimum (représentée en vert sur la figure 2.c) où la propagation monomode est assurée.

Les résultats obtenus avec les fibres Ap2 sont quant à eux présentés sur la figure 3. La figure 3.a présente les distributions d'intensité mesurées en champ proche en sortie de la fibre Ap2 ayant un diamètre de cœur $D_{cœur}$ ~ 80 µm pour des longueurs d'onde de 1 µm, 1,2 µm, 1,4 µm et 2 µm. Même en modifiant les conditions d'injection à l'entrée de cette fibre, seule la propagation du mode fondamental est observée. En compilant l'ensemble des mesures effectuées avec ces fibres Ap2, nous avons également pu définir une zone de fonctionnement optimum où la propagation monomode est assurée (cf. figure 3.b). On constate alors que cette zone est plus large que celle obtenue pour la fibre Ap1. En outre, une fibre Ap2 présentant un diamètre de cœur de 140 µm tout en conservant un caractère monomode a ainsi pu être obtenu pour la première fois.



(a) (b)

Fig. 3 : (a) Observation du champ proche en sortie de la fibre Ap2 ($D_{cœur}$ ~ 80 µm) pour λ=1 µm, λ=1,2 µm, λ=1,4 µm et λ=2 µm.
(b) Représentation de la distribution d'intensité mesurée en champ proche en sortie de différentes fibres Ap2 en fonction du diamètre du cœur et de la longueur d'onde de travail. La zone verte représente la zone de fonctionnement monomode.

CONCLUSION

Nous avons fabriqué pour la première fois deux structures de fibres passives basées sur une rupture contrôlée de la périodicité de la gaine optique microstructurée afin de favoriser la délocalisation des modes d'ordre supérieur au bénéfice du confinement du seul mode fondamental. La fibre Ap2 montre notamment un comportement monomode à λ = 1 µm pour un cœur de diamètre $D_{cœur}$ = 80 µm et à λ = 2 µm pour un cœur de diamètre $D_{cœur}$ = 140 µm. Ces fibres apériodiques ouvrent donc la voie vers le développement de nouvelles architectures de fibres actives pour les lasers fibrés de haute puissance.

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet AVANTAGE, co-financé par l'Union européenne (« Fonds européen de développement économique et régional ») et Eolite Systems.

REFERENCES

[1] M. O'Connor *et al.*, CLEO US, paper CThA3, (2009)
[2] L. Dong *et al.*, SPIE Proc., vol. 7195, p. 71950N–71950N–8, (2009)
[3] F. Stutzki *et al.*, Optics.Letters, 37(6), 1073-1075 (2012)
[4] R. Dauliat *et al.*, Optics Express, Vol. 21, Issue 16, pp. 18927-18936 (2013)
[5] D. Schimpf *et al.*, CLEO: paper CFM6, (2011)