

Fibres optiques topographiques

Alexandre KUDLINSKI*, Arnaud MUSSOT, Géraud BOUWMANS

Laboratoire PhLAM (UMR CNRS 8523), IRCICA (USR CNRS 3380), FiberTech Lille, Université de Lille, 59000 Lille, France

*alexandre.kudlinski@univ-lille.fr

L'avènement des fibres à cristal photonique dans les années 90 a été une révolution sur les plans tant scientifique qu'applicatif. Leur structuration transverse complexe leur confère en effet des propriétés de guidage inédites. Les fibres optiques topographiques introduites dans les années 2010 offrent, quant à elles, un degré de liberté supplémentaire grâce à leur structuration longitudinale contrôlée. Bien que leur potentiel applicatif soit loin d'être totalement exploré, elles ont déjà été largement exploitées en optique guidée.

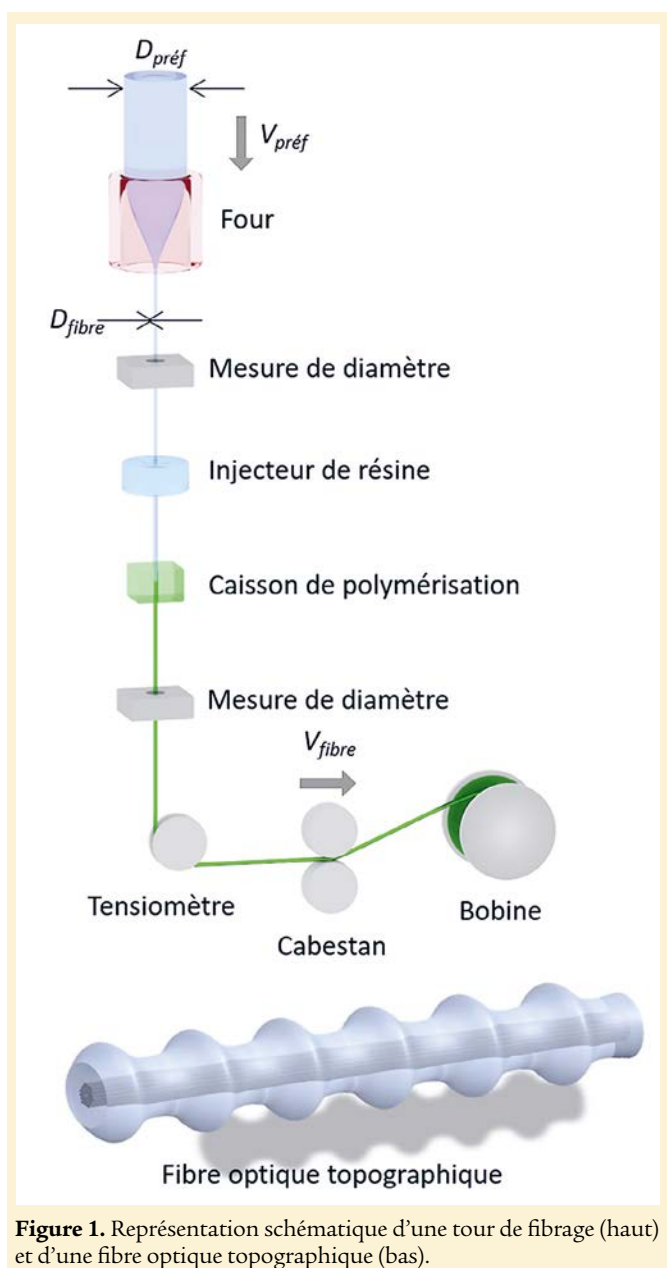


Figure 1. Représentation schématique d'une tour de fibrage (haut) et d'une fibre optique topographique (bas).

Historiquement, l'un des principaux critères de qualité d'une fibre optique de télécommunication est, au-delà de la pureté du verre, son uniformité le long de son axe de propagation : on souhaite que les variations de diamètre inhérentes à la technique de fabrication soient les plus faibles possibles tout au long de la fibre. Cependant, la fabrication de composants entièrement fibrés, tels que les adaptateurs de modes ou encore les coupleurs, a nécessité le développement de techniques d'effilage de fibres optiques dans les années 80 [1,2] : une fois fabriquée, la fibre est chauffée localement, puis étirée afin de réduire localement son diamètre extérieur, et donc celui de son cœur. Ces fibres effilées (*fiber tapers*) possèdent typiquement une transition centimétrique. Plus récemment sont apparues les fibres topographiques, dont le diamètre extérieur, et donc les propriétés de guidage, varient de façon contrôlée (périodique ou quasi arbitraire) le long de la fibre. Cette modulation est créée directement lors du processus de fabrication de la fibre, et l'échelle des variations est typiquement métrique. Initialement motivée par la volonté d'élargir le spectre des sources supercontinuum à fibre vers l'ultra-violet [3], cette nouvelle classe de fibres optiques a ouvert de nombreuses perspectives en optique guidée, et en particulier dans le domaine de l'optique non-linéaire ou des lasers à fibre.

Fabrication

La fabrication de fibres optiques en silice classique (comme celles pour les télécommunications) requiert l'utilisation d'une tour de fibrage qui permet d'étirer une préforme de diamètre $D_{préf}$ en fibre optique de diamètre D_{fibre} bien plus faible (voir figure 1). Cette réduction de diamètre s'effectue à l'intérieur d'un four à haute température (~ 2000 °C) en descendant la préforme à une vitesse lente, $V_{préf}$, alors que la fibre est entraînée par un cabestan en bas de la tour à une vitesse rapide, V_{fibre} , dont la valeur nominale peut être déterminée par la relation

$$D_{fibre}^2 \times V_{fibre} = D_{préf}^2 \times V_{préf}$$

Dans le cas de fibres à cristal photonique air/silice, la procédure est similaire, sauf qu'il est possible d'obtenir une transformation non homothétique lors de l'étirage en ajustant la pression appliquée aux zones d'air.

Classiquement le fabricant souhaite une fibre la plus homogène possible si bien que des systèmes d'asservissement sont mis en place afin d'assurer un diamètre de fibre le plus constant possible, le plus simple de ces systèmes étant d'asservir la vitesse V_{fibre} sur la mesure du diamètre D_{fibre} via une boucle PID (proportionnel, intégral, dérivé). Pour certaines applications cependant, comme la mise au point de sources supercontinuum à spectre ultra-large, il est intéressant d'avoir des propriétés de guidage différentes au début et à la fin de la fibre. Il peut aussi être intéressant d'avoir des propriétés de guidage qui varient périodiquement le long de la fibre, pour obtenir des quasi-accords de phase par exemple. Afin de pouvoir réaliser des variations longitudinales de diamètre de fibre de forme arbitraire mais contrôlée, un système a été développé au PhLAM pour contrôler temporellement la vitesse de la fibre $V_{\text{fibre}}(t)$. L'équation (1) montre que le diamètre D_{fibre} dépend de la vitesse V_{fibre} et il est donc possible d'imprimer une fonction du diamètre $D_{\text{fibre}}(z)$ en contrôlant dans le temps la vitesse de la fibre $V_{\text{fibre}}(t)$. Précisons toutefois que cette approche est limitée par le fait que la réponse à un

échelon de variation de V_{fibre} n'est pas parfaitement instantanée ni linéaire (notamment de par le volume et la forme de la partie molle de silice dans le four). Ainsi des périodes de modulation très courtes (typiquement < 10 cm) ne sont pas accessibles avec cette procédure. Néanmoins cette méthode simple a permis de réaliser avec succès le large panel de fibres topographiques illustrées à la figure 2 et présentées tout au long de cet article.

Propriétés

L'intérêt d'induire volontairement une variation du diamètre extérieur de la fibre réside principalement dans le fait que la dimension du cœur suit homothétiquement la même variation, ce qui modifie par conséquent les paramètres de guidage de la fibre. Dans le cas de variations faibles du diamètre extérieur, variations de l'ordre de $\pm 10\%$, c'est principalement le paramètre de dispersion chromatique de vitesse de groupe, D , qui est modifié. Notons que dans le cas de variations importantes du diamètre extérieur (nettement supérieures à $\pm 10\%$), le paramètre non-linéaire et le contenu modal peuvent également être modifiés significativement [4]. Cependant, la dépendance des paramètres de guidage par rapport aux variations

QUELQUES EXEMPLES DE FIBRES OPTIQUES TOPOGRAPHIQUES

La modulation temporelle de la vitesse du cabestan lors du fibrage se traduit par une modulation du diamètre extérieur de la fibre en fonction de sa longueur. Il est ainsi possible d'obtenir une large gamme de types de modulation périodique comme illustré sur l'encart de gauche : modulations sinusoïdales de période 5 m (courbe orange), 50 cm (courbe rouge), modulation d'amplitude bifrédence (courbe grise), modulation de fréquence (courbe bleue), modulation impulsionnelle (courbe verte). Il est bien sûr possible de réaliser des fibres topographiques non périodiques telles que celles présentées dans l'encart en haut à droite : décroissance linéaire (courbe verte), exponentielle (courbe bleue), de forme gaussienne (courbe orange) ou encore de forme parabolique (courbe rouge). Ces modulations peuvent être obtenues y compris pour des fibres à cristal photonique comme illustré en bas à droite par les photos au microscope électronique des faces d'entrée et de sortie d'une fibre topographique contenant des trous d'air. Sur ces photos, prises avec le même grossissement, le cœur au centre de la structure est en silice pure et apparaît en gris alors que les trous d'air apparaissent en noir. Les degrés de liberté permis par l'association d'une structure transverse à cristal photonique et d'une modulation longitudinale de la fibre enrichissent considérablement les processus de photonique non-linéaire.

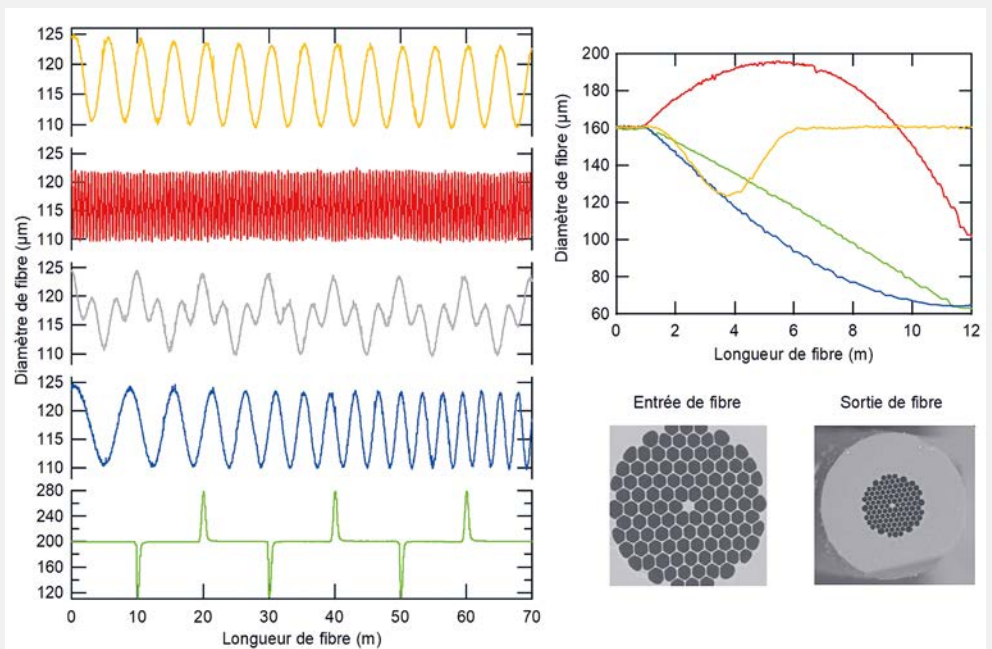


Figure 2. Exemples de modulations longitudinales du diamètre de fibre.

de diamètres dépend in fine de la structure transverse de la fibre. Pour illustrer cela, considérons deux exemples de fibres topographiques « oscillantes » : la première est une fibre microstructurée air/silice dont le diamètre évolue de façon sinusoïdale avec une période de 10 m et une amplitude de $\pm 1,6\%$ (figure 3a). La seconde est une fibre conventionnelle à dispersion décalée dont le diamètre est modulé avec une période de 10 m et une variation d'amplitude de $\pm 1,6\%$ (figure 3b). Les figures 3c et 3d représentent les courbes de dispersion calculées pour le diamètre moyen de 125 μm (trait pointillé noir), pour le diamètre minimal de 110 μm pour la fibre microstructurée et de 123 μm pour la fibre conventionnelle (trait bleu) et pour le diamètre maximal de 140 μm pour la fibre microstructurée et de 127 μm pour la fibre conventionnelle (trait rouge). Ainsi, la courbe de dispersion oscille continuellement le long de la fibre entre les courbes bleue et rouge. Dans les deux cas, l'excursion de la longueur d'onde de dispersion nulle sur une période est de 50 nm, bien que l'amplitude des variations de diamètre diffère d'un ordre de grandeur. De plus, l'évolution de la longueur d'onde de dispersion nulle en fonction du diamètre est opposée : pour la fibre microstructurée, la longueur d'onde de dispersion nulle

augmente lorsque le diamètre augmente, alors que c'est l'inverse pour la fibre conventionnelle.

Ainsi, l'évolution longitudinale des propriétés de guidage des fibres topographiques est spécifique à la structure transverse de fibre considérée, ce qui offre un grand degré de versatilité.

Exemples d'applications

Les fibres topographiques ont trouvé des applications dans de nombreuses branches de l'optique guidée, et particulièrement en optique non-linéaire. Par exemple, les fibres topographiques à diamètre linéairement décroissant ont permis d'améliorer significativement l'étendue spectrale des sources supercontinuum et ainsi d'atteindre la région UV (figure 4a) [3]. Par ailleurs, en contrôlant précisément l'évolution du diamètre point à point le long de la fibre, il est possible de contrôler la trajectoire spectrale de solitons et d'exacerber ou au contraire de ralentir leur décalage fréquentiel dû à l'effet Raman (figure 4c) [5]. Notons qu'il est aussi possible de contrôler leur durée en même temps, et ainsi créer des sources d'impulsions ultra-courtes à fibre, dont il est possible dans une certaine mesure de choisir la durée

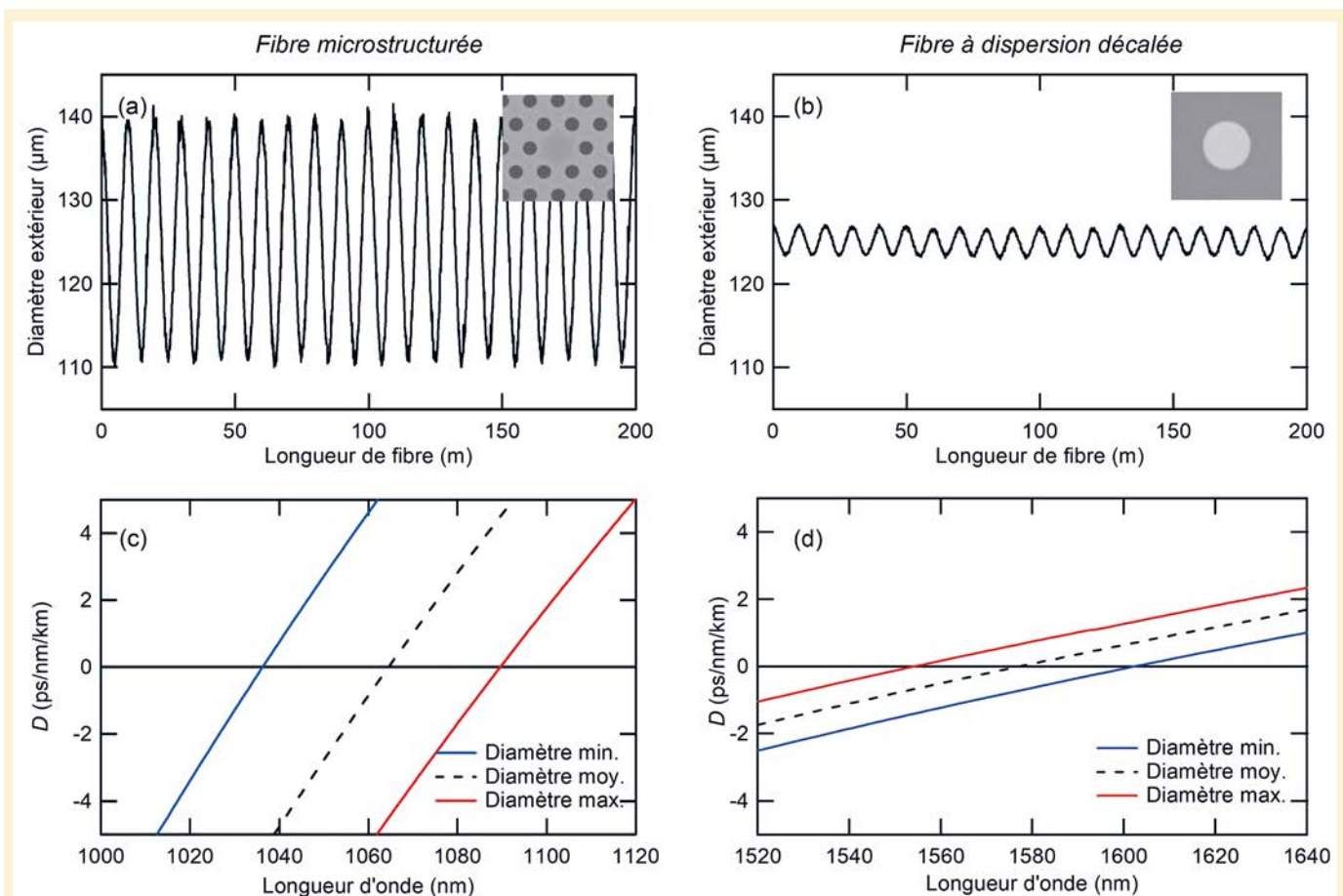


Figure 3. Propriétés de dispersion de vitesse de groupe des fibres topographiques « oscillantes ». (a), (b) Évolution du diamètre extérieur de la fibre en fonction de sa longueur (mesurée pendant la fabrication) pour (a) une fibre microstructurée et (b) une fibre conventionnelle à dispersion décalée. (c), (d) Paramètre de dispersion chromatique calculé pour (c) la fibre microstructurée et (d) la fibre à dispersion décalée. Les courbes en traits pointillés noirs correspondent à la valeur moyenne de D le long de la fibre, celles en trait bleu et rouge correspondent respectivement à sa valeur au diamètre minimal et maximal de la fibre.

iXblue

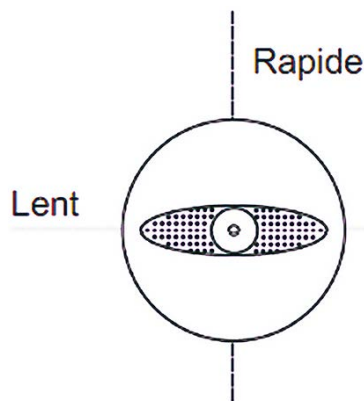
PHOTONICS

Tour d'horizon des différentes fibres optiques polarisantes fabriquées et commercialisées par iXblue Photonics

iXblue Photonics commercialise une large gamme de fibres optiques dédiées à la gestion de la polarisation.

Fibre à maintien de polarisation (PM)

La propagation d'un signal polarisé linéairement dans une fibre optique nécessite l'utilisation d'une fibre à maintien de polarisation (PM). La lumière doit être injectée selon l'axe d'un des deux modes de cette fibre pour que l'état de polarisation linéaire soit maintenu lors de la propagation.



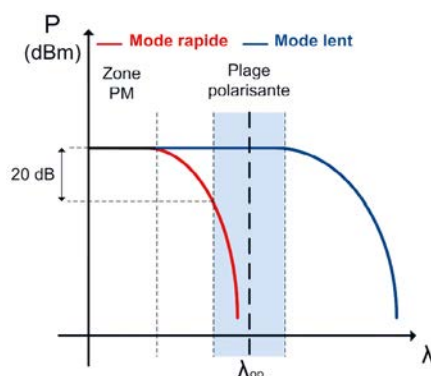
Malgré l'utilisation d'une fibre PM, un couplage de mode persiste lors de la propagation. Si la source est très cohérente, l'utilisation d'un polariseur en sortie de fibre pour nettoyer l'état de polarisation n'est pas une solution car les interférences entre les modes couplés en entrée et recouplés en sortie induisent une dépendance temporelle et fréquentielle de la puissance en sortie du polariseur.

La solution la plus élégante pour pallier ces problèmes de couplage de modes consiste à remplacer la fibre PM par une fibre polarisante (PZ) pour laquelle le signal se propageant sur l'axe orthogonal serait idéalement très fortement atténué (> 50 dB).

Fibre polarisante (PZ)

iXblue Photonics a choisi d'utiliser la structure classique de fibre

dite « TIGER » pour la fabrication de ses fibres polarisantes. Pour ce type de fibre, la biréfringence est obtenue au moyen d'une gaine contraignante de forme elliptique autour du cœur monomode. Cette structure est préférée aux structures « PANDA » et « BOW-TIE » car elle offre de nombreux avantages comme par exemple une grande homogénéité des paramètres optiques le long du fibrage pour des longueurs beaucoup plus importantes. Elle permet également d'atteindre les niveaux de biréfringence les plus élevés pour les fibres PM.



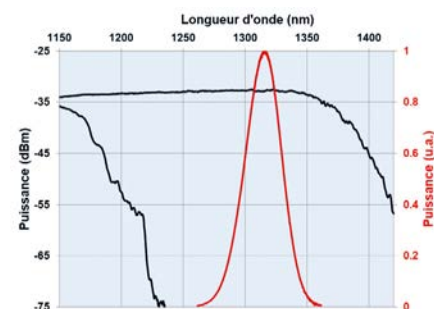
L'optimisation de cette structure dans le but d'obtenir une fibre polarisante est basée sur la création d'un profil d'indice à fuite sur l'axe rapide.

Une fibre polarisante est donc une fibre monomode qui ne transmet qu'un seul des deux états de polarisation linéaire du mode fondamental sur une certaine bande spectrale. La largeur de cette bande spectrale et l'effet polarisant associé sont directement liés au profil d'indice de réfraction de la fibre et à ses conditions d'utilisation.

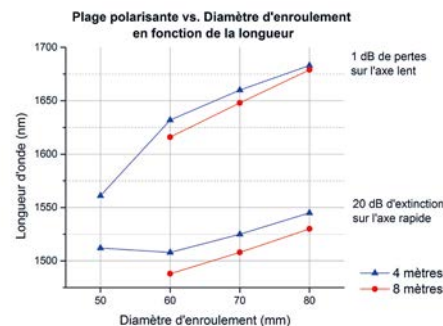
En fonction des applications et de leurs contraintes, ces fibres polarisantes sont conçues pour fonctionner avec ou sans courbure, c'est-à-dire bobinées ou droites. Les longueurs accessibles vont de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres.

Polariseurs fibrés (POL)

Ces fibres polarisantes peuvent également être utilisées comme polariseur tout-fibre pour polariser une source fine ou large (#100 nm).



La fibre est alors enroulée suivant un diamètre donné. Pour avoir la plage polarisante centrée sur la bonne longueur d'onde, il faut adapter la longueur de fibre sous test en fonction du diamètre de bobinage.



- Longueurs d'onde d'utilisation : 780, 820, 980, 1060, 1310 or 1550 nm
- Diamètres de fibre : 80 ou 125 μm
- Ratio d'extinction : > 50 dB
- Bande passante : > 100 nm
- Applications : Polariseurs, Lasers à fibre, Transmission de laser monofréquence, Interférométrie, Jarretières, Ligne à retard, etc.

CONTACT

iXblue Photonics
 thomas.villedieu@ixblue.com
 Visitez notre boutique en ligne :
<https://photonics.ixblue.com/>

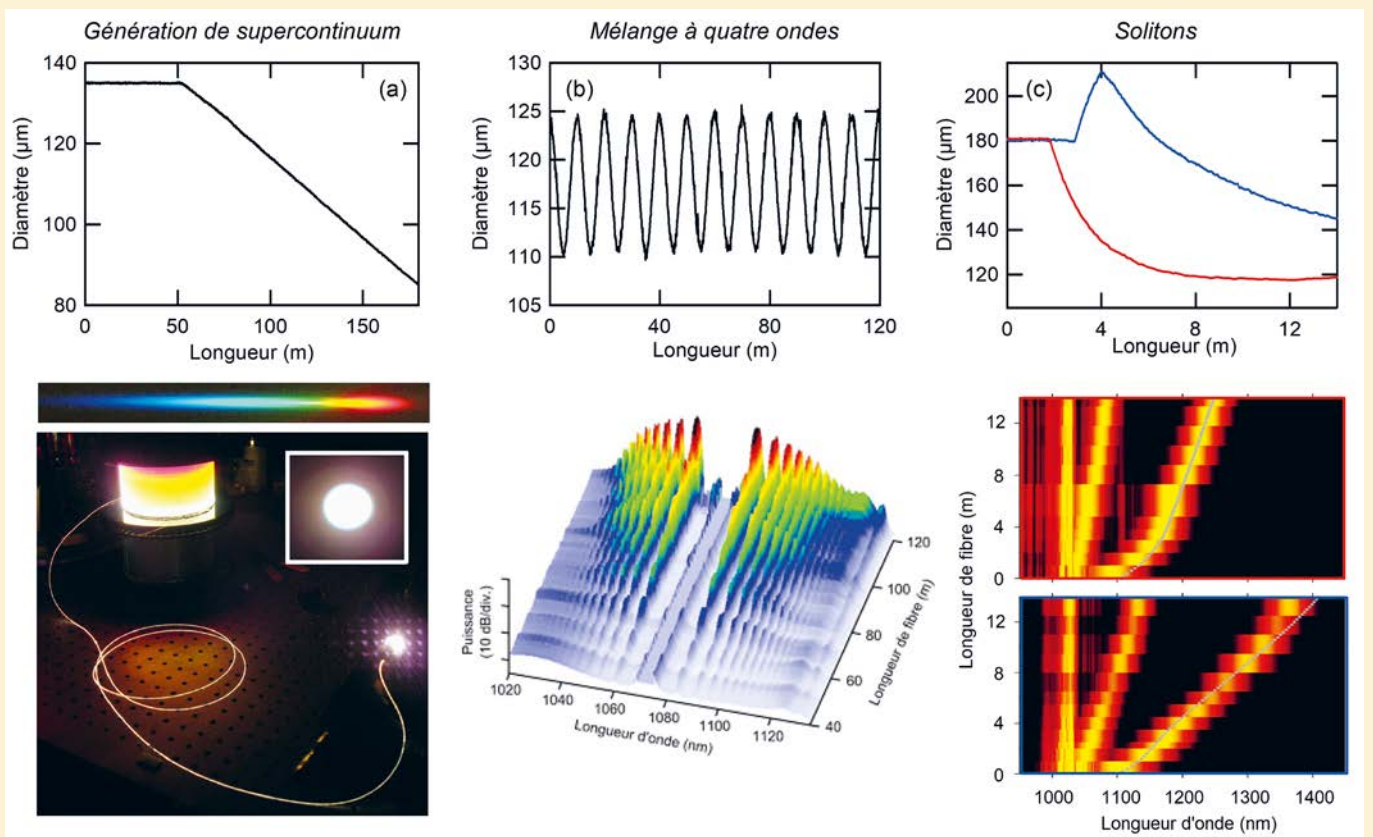


Figure 4. Exemples d'applications des fibres topographiques en photonique non linéaire. (a) Génération de supercontinuum visible et UV, (b) mélange à quatre ondes quasi accordé en phase et (c) contrôle de la longueur d'onde de solitons ultra brefs.

et la longueur d'onde [6]. D'un point de vue fondamental, ces fibres ont également permis d'observer des phénomènes inattendus tels que l'explosion totale d'un soliton [7] ou au contraire la transformation d'une onde dispersive en un soliton fondamental [8]. Enfin, en utilisant des fibres à dispersion oscillante, il est possible d'observer des mélanges non-linéaires inédits quasi-accordés en phase, dans lesquels l'oscillation du paramètre de dispersion joue le rôle d'un réseau de dispersion à l'origine du quasi-accord de phase (figure 4b) [4]. Les fibres topographiques ont suscité de nombreuses autres applications, parmi lesquelles nous pouvons citer la mise au point d'amplificateurs paramétriques à fibre optique ayant une bande de gain aplatie [9], la réduction du seuil Brillouin [10], ou encore les lasers et amplificateurs à fibre de forte puissance [11–14].

Conclusion

Les fibres optiques topographiques se sont rapidement imposées, notamment dans les domaines de la photonique non-linéaire ou des lasers à fibre. La richesse liée à la grande variété de structures transverses de fibres associées aux profils longitudinaux réalisables lors de l'étape de fibrage fait que nous sommes loin d'avoir épuisé le potentiel applicatif des fibres topographiques, que ce soit dans le domaine des sciences fondamentales ou de l'aspect beaucoup plus applicatif. Le concept de « topographie optique », c'est-à-dire des modifications contrôlées des propriétés de guidage dans

l'axe de propagation, est également applicable aux guides d'onde intégrés, et pourrait ainsi s'élargir au domaine de l'optoélectronique intégrée.

Remerciements

CPER Photonics for Society, LABEX Cempi, EQUIPEX Flux. <https://fibertech.univ-lille.fr/>

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] B.S. Kawasaki et al., *Opt. Lett.* **6**, 327 (1981)
- [2] K.P. Jedrzejewski et al., *Electron. Lett.* **22**, 105 (1986)
- [3] A. Kudlinski et al., *Opt. Express* **14**, 5715 (2006)
- [4] A. Mussot et al., *Adv. Opt. Photonics* **10**, 1 (2018)
- [5] A. Bendahmane et al., *Opt. Lett.* **38**, 3390 (2013)
- [6] F. Braud et al., *JOSA B* **32**, 2146 (2015)
- [7] A. Kudlinski et al., *Opt. Lett.* **40**, 2142 (2015)
- [8] F. Braud et al., *Opt. Lett.* **41**, 1412 (2016)
- [9] C. Fourcade-Dutin et al., *Opt. Express* **23**, 10103 (2015)
- [10] B. Stiller et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24**, 667 (2012)
- [11] V. Filippov et al., *Opt. Express* **16**, 1929 (2008)
- [12] K. Bobkov et al., *Opt. Express* **25**, 26958 (2017)
- [13] INO, <https://www.ino.ca/fr/>
- [14] Ampliconix, <http://ampliconix.com/>