

COMPRENDRE

Les fibres microstructurées : 20 ans d'existence et un vaste éventail d'applications

Laurent PROVINO*, Achille MONTEVILLE, David LANDAIS, Olivier LE GOFFIC, Adil HABOUCHA, Thierry TAUNAY, David MECHIN
Photonics Bretagne, Lannion, France, *lprovino@photonics-bretagne.com

Les fibres optiques microstructurées, également appelées fibres à trous ou fibres optiques à cristal photonique sont un type récent de guides de lumière originaux et performants apparues dans le milieu des années 1990. Elles se sont depuis imposées comme une technologie incontournable de la photonique moderne. L'originalité première de ce genre de fibre a été de permettre le guidage de la lumière dans un matériau unique grâce à leur structuration périodique. Après une vingtaine d'années de recherche, la gamme possible de structures de ces fibres optiques s'est grandement étoffée, donnant lieu à plusieurs catégories de fibres microstructurées classifiées par type de mécanisme de guidage (par réflexion totale interne, par bande interdite photonique, et par couplage inhibé). Arrivées à maturité aujourd'hui, ces fibres optiques ont démontré au fil des années un potentiel d'applications extrêmement vaste et ce, dans des domaines très variés allant de la défense aux applications biophotoniques, sous la forme de capteurs optiques ou de lasers fibrés de forte puissance.

La naissance d'une nouvelle famille de fibres optiques

La propagation guidée de la lumière a été décrite pour la première fois par les publications de Colladon et Babinet en 1842 dans les comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Ces deux auteurs y décrivaient respectivement la propagation non rectiligne de la lumière dans un filet d'eau ou dans une tige de verre courbée. L'utilisation de ces guides de lumière sur des longues distances a été rendue possible à partir du début des années 1970 grâce à la réalisation de fibres optiques constituées d'un cœur et d'une gaine optique en verre qui a fortement réduit leurs pertes aux courbures mais surtout grâce à la synthèse de silice ultra-pure par l'équipe américaine de Charles Kao qui lui a d'ailleurs valu le

prix Nobel de Physique en 2009. Depuis cette époque, les caractéristiques de ces fibres ont continué d'évoluer pour devenir de plus en plus complexes et atteindre des performances leur permettant d'être des composants incontournables dans les réseaux de télécommunications actuels. Les degrés de liberté apportés par le choix du profil d'indice de réfraction transverse a permis de répondre à différentes applications, telles que les fibres double gaine intégrant un cœur de silice dopée terre rare pour les amplificateurs optiques et lasers à forte puissance, ou des fibres à faible dispersion chromatique utiles pour les télécommunications associant longues distances et hauts débits. Leurs domaines d'applications furent étendus à partir de 1996 par le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bath (UK), avec la première fabrication d'un nouveau type de fibre optique

constituée d'un matériau unique en silice pure comprenant un agencement périodique de canaux d'air de dimensions micrométriques parallèles à l'axe de propagation (notons que le principe de cette fibre avait déjà été proposé 20 ans auparavant par Kaiser et ses collaborateurs au sein du laboratoire Bell, sans susciter particulièrement d'intérêt auprès de la communauté scientifique [1]). Cette nouvelle génération de guide optique fut baptisée fibre à cristal photonique en référence à la modulation périodique à deux dimensions de l'indice de réfraction de la gaine, présentant potentiellement des propriétés de bandes interdites similaires à celles des semi-conducteurs. En effet, la propagation transverse d'une onde dans un arrangement périodique est régie par des conditions d'interférence constructives ou destructives autorisant ou non, la pénétration dans le cristal photonique

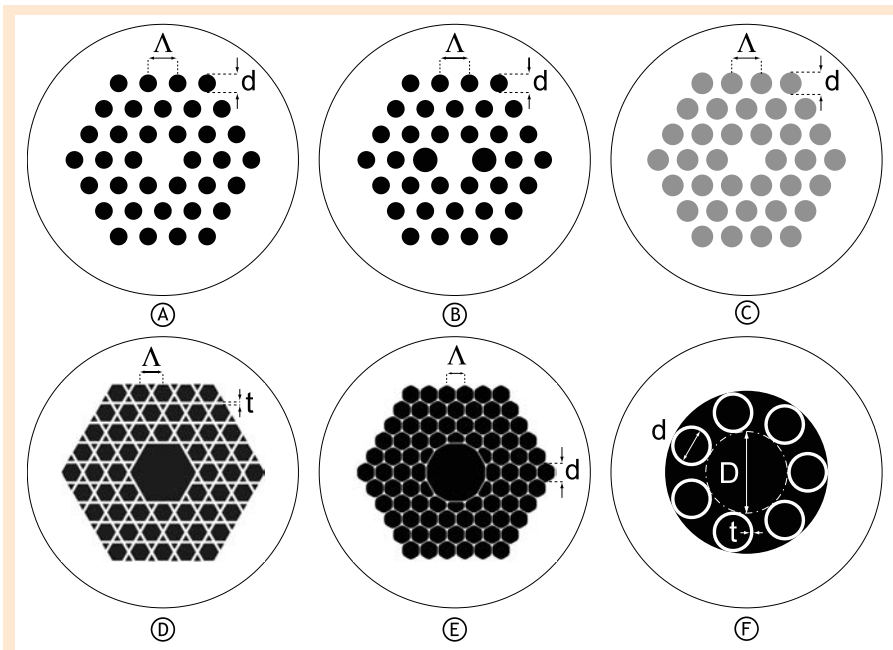


Figure 1. Représentations schématiques de différentes structures de fibres microstructurées. Les régions noires sont les régions composées d'air, les régions blanches sont en silice pure et les régions grises sont en silice dopée. (a) Fibres microstructurées à cœur haut indice. (b) Fibres microstructurées à maintien de polarisation. (c) Fibres toutes solides à bandes interdites et cœur bas indice. (d) Fibres à cœur creux à gaine Kagomé. (e) Fibres à cœur creux bandes interdites. (f) Fibre à cœur creux à gaine tubulaire.

catégories de guides de lumière n'a fait que croître sur les dix années suivantes, donnant de nouvelles séries de fibres : monomodes à large cœur passif ou actif, à dispersion contrôlée, à maintien de polarisation, à cœur suspendu, à multi-cœurs, à structure hybride, et à bandes interdites à cœur haut ou bas indice. En 2007, les fibres dont le principe de guidage optique était jusque-là dicté par le principe de bande interdite photonique, a vu émerger une nouvelle catégorie de fibre à cœur creux appelée fibre à gaine Kagomé [5]. Leur principe de guidage est basé sur le couplage inhibé entre la lumière qui se propage dans le cœur de la fibre et la lumière qui se propage dans la gaine. Très récemment, une sous-catégorie des fibres dont le guidage est obtenu par couplage inhibé est apparue, se différenciant des fibres à gaine Kagomé par leur structure de gaine simplifiée dite tubulaire [6]. Au fil des recherches et des développements, l'ensemble de ces fibres optiques, que nous désignerons par la suite par le terme générique de fibre optique microstructurée (FOM, *figure 1*), a permis de répondre à un vaste éventail de besoins dans de nombreux domaines aussi bien appliqués (physique des lasers, télécommunications, instrumentation, micro-usinage, médecine, biologie) que fondamentaux (optique quantique).

des ondes lumineuses en fonction de leur fréquence. Or, parce que la première réalisation présentait une faible proportion d'air et un manque de régularité du point de vue de la taille et de la position des trous d'air, le guidage ne pouvait être lié à un phénomène de bande interdite photonique. L'absence de trou au centre de l'arrangement (que l'on appelle également défaut) de cette fibre tenant lieu de cœur, permettait en fait de guider la lumière par un principe très proche de celui de la réflexion totale interne des fibres dites classiques. D'autre part, les circonstances liées aux études de cette géométrie particulière ont permis la découverte de la première fibre infiniment monomode sur un large domaine spectral s'étendant de 450 nm à 1550 nm [2]. Très vite, les premières fibres dans laquelle la lumière est guidée par le seul effet de bandes interdites photoniques sont proposées et réalisées dès 1999 [3]. Cette fois, la lumière est guidée dans un défaut de la structure périodique jouant le rôle de cœur dont l'indice de réfraction est plus faible que l'indice de réfraction moyen du milieu qui l'entoure. La première fibre à bandes interdites photoniques

reportée est une fibre à cœur creux (cœur bas indice) où la lumière est confinée dans un plus large trou d'air de la structure, divisant ainsi la famille des fibres à cristal photonique en deux catégories différenciées par le type de guidage [4]. Dès lors, la ramification en sous-familles de ces deux nouvelles

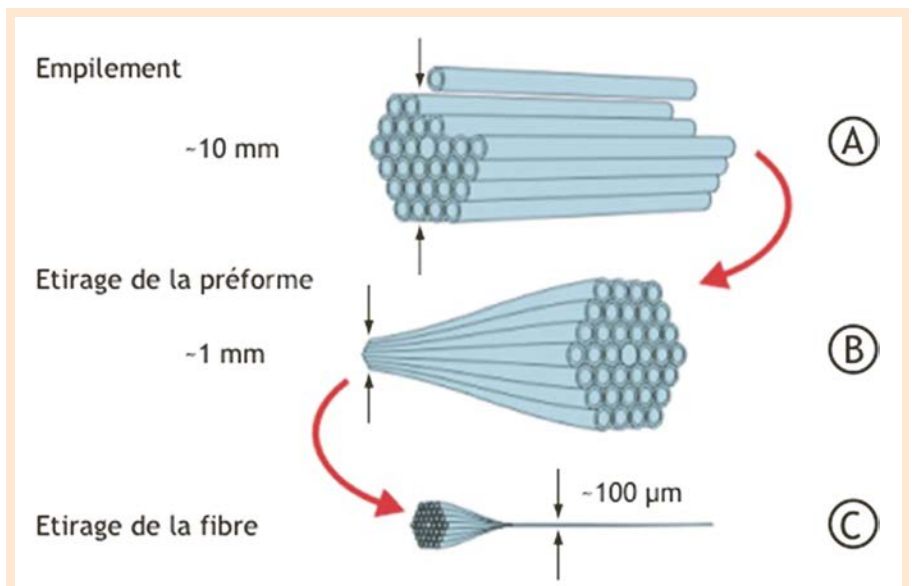


Figure 2. Présentation schématique des différentes étapes de fabrication des fibres à cristal photonique : (a) assemblage autour d'une baguette centrale de capillaires de dimension millimétrique, (b) étirage de la préforme manchonnée en canne, (c) fibrage de la canne pour donner une fibre de dimension micrométrique.

Comment les fabrique-t-on ?

Les FOMs sont fabriquées en utilisant des variétés de techniques différentes telles que le perçage, l'extrusion ou le moulage, et l'assemblage-étirage. C'est cette dernière technique qui est aujourd'hui la plus répandue dans le cas des fibres en silice. Elle consiste à réaliser une préforme identique à la géométrie visée en empilant des capillaires et/ou des barreaux circulaires de taille millimétrique, ce qui rend la maîtrise de la microstructure plus aisée (figure 2). Les FOMs sont ensuite conçues de la même manière que les fibres conventionnelles, en réalisant le fibrage de la préforme. La grande diversité des géométries pouvant être réalisées avec cette technique (figure 3) a permis d'ajuster les propriétés de

guidage de façon parfois spectaculaire. Ces propriétés sont principalement définies, pour la majorité des FOMs, par l'espacement périodique Λ des inclusions de hauts/bas indices de diamètre d , et par la dimension et la forme du cœur plein ou creux. Dans le cas des fibres à couplage inhibé, les propriétés de guidage par bandes sont essentiellement définies par l'épaisseur t des ponts de silice ou des capillaires formant la gaine microstructurée autour du cœur creux.

À quoi peuvent-elles bien servir ?

Des fibres infiniment monomodes

Parmi les propriétés spécifiques aux FOMs composées d'un arrangement

de trous d'air autour d'un cœur en silice, la plus utile est peut être celle permettant de guider un unique mode présentant une répartition d'intensité quasi-gaussienne sur tout le domaine de transparence de la silice (de 300 à 2000 nm environ). Celle-ci découle de la forte dépendance de l'indice effectif de la gaine microstructurée (*i.e.*, indice effectif du mode de plus haut indice effectif se propageant dans la gaine), à la fois à la dimension des trous d'air et à la longueur d'onde. Cette forte dispersion de l'indice effectif provient du fait que la dimension caractéristique de la structuration de la silice est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde optique. Aux courtes longueurs d'onde, le champ modal est beaucoup plus confiné dans le cœur, réduisant ainsi la différence d'indice effectif entre le cœur et la gaine alors que pour les grandes longueurs d'onde, le champ modal s'étend à travers les trous, diminuant l'indice effectif de la gaine [4]. La conséquence directe de la diminution de l'indice effectif de la gaine pour les grandes longueurs d'onde est que la fréquence de coupure du second mode peut être repoussée à l'infini, ce qui rend la fibre uni-modale pour toutes les longueurs d'onde optiques même lorsque le rayon de champ du mode guidé est grand (diamètre $\approx 40 \Lambda$). Ceci n'est possible que lorsque la proportion d'air dans la fibre reste faible ($d/\Lambda \leq 0,4$) ; les FOMs avec une grande proportion d'air sont multimodes pour les courtes longueurs d'onde, comme les fibres conventionnelles.

Des sources compactes blanches

La dispersion de vitesse de groupe et la pente de la dispersion peuvent varier radicalement selon la taille et/ou l'arrangement des trous d'air dans les FOMs toutes solides. Il est ainsi possible de réaliser des fibres à dispersion faible et aplatie sur une large bande ou encore de positionner le zéro de dispersion (ZDW) chromatique en dessous de celui de la silice pure ($\Lambda_{ZDW} < 1270$ nm), chose impossible à réaliser avec une fibre monomode conventionnelle.

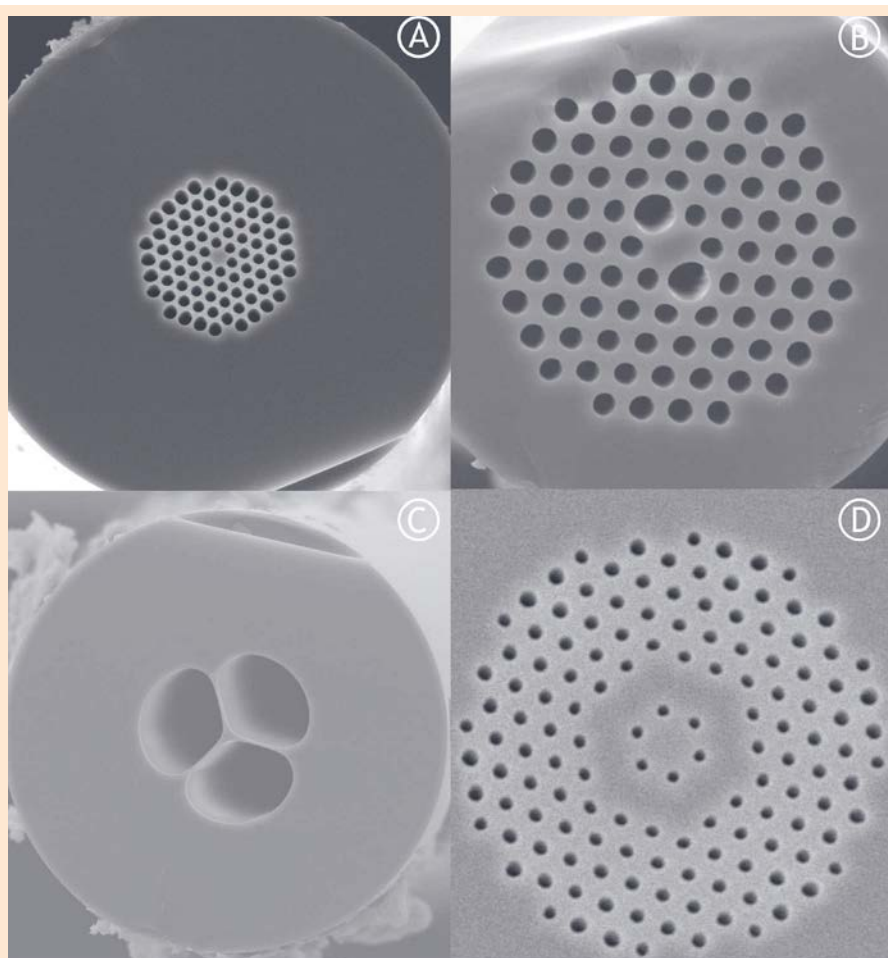


Figure 3. Photographies obtenues par microscopie électronique de fibres microstructurées utilisées pour leurs propriétés peu usuelles : (a) fibre à petit cœur utilisée pour la génération de supercontinuum, (b) fibre à maintien de polarisation, (c) fibre à cœur suspendu utilisée pour la conception de capteurs et (d) fibre à compensation de dispersion chromatique fonctionnant dans la bande C. Crédit : Photonics Bretagne (gamme de produits Perfos)

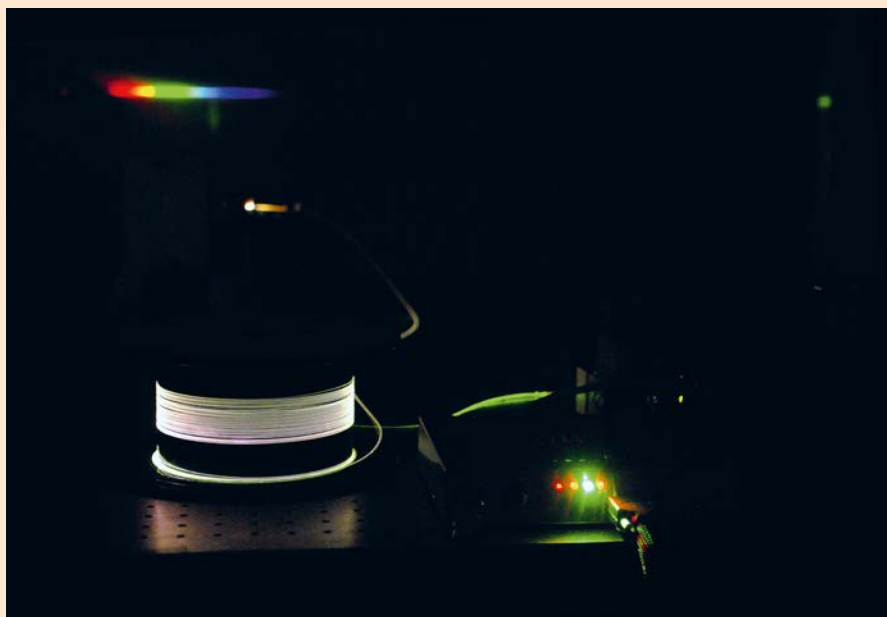


Figure 4. Photographie d'une source supercontinuum générée en injectant une source laser nanoseconde de 1064 nm dans 8 mètres de fibre microstructurée air/silice à petit cœur.

Optiques de précision fabriqués par Edmund Optics

Edmund Optics® (EO) est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de composants optiques, d'imagerie et de technologie photonique qui, depuis 1942, dessert divers marchés, notamment les sciences de la vie, la biomédecine, l'inspection industrielle, les semi-conducteurs, la R&D et la défense. EO conçoit et fabrique une vaste gamme de composants optiques, de lentilles d'un ou plusieurs éléments, de systèmes d'imagerie et d'équipements optomécaniques, tout en prenant en charge les applications OEM avec la production en série de marchandises standard immédiatement disponibles et de produits personnalisés. Présent dans plus de neuf pays à travers le monde, EO emploie plus de 1 000 personnes et poursuit son expansion.

EO est fière d'aider ses clients, du prototype à la production en série, et se spécialise dans la création de solutions rentables qui respectent les spécifications, les échéanciers et les budgets de ses clients. Qu'il s'agisse d'optiques de stock, d'un composant optique réalisé d'après dessin technique du client, de l'ingénierie d'application experte pour optimiser la conception ou d'une conception entièrement personnalisée pour répondre aux besoins du client, nos ingénieurs peuvent créer des solutions idéales pour chaque défi optique. À chaque étape, Edmund Optics® s'engage à assurer la qualité des produits et des procédures.

Visitez notre site Web pour savoir comment tirer profit de notre expertise en ingénierie, de nos capacités de fabrication de composants optiques de précision. et de notre vaste inventaire de composants standard.

CONTACT

Alexis Liagre
Regional Sales Manager
ALiagre@edmundoptics.fr
www.edmundoptics.fr
+33 (0)820207555

Cet ajustement de la longueur d'onde de dispersion nulle est essentiel si on veut limiter l'élargissement temporel d'une impulsion lumineuse au cours de sa propagation, comme c'est le cas lorsqu'on réalise des sources compactes à large spectre, communément appelées supercontinuum (*figure 4*), en propageant une source impulsionnelle et puissante à travers un matériau non-linéaire. En raison de la flexibilité que les FOMs offrent en terme d'ajustement de la position du zéro de dispersion chromatique, elles se sont imposées comme la solution idéale pour la réalisation de source large bande compacte couvrant l'ensemble du domaine spectral compris entre 450 nm et 2400 nm, à partir de micro-laser pulsé à 1064 nm en régime nanoseconde ou picoseconde injecté dans une dizaine de mètres de fibre [4]. Il est également possible de générer des sources blanches capables de descendre plus bas dans l'ultraviolet proche (350–400 nm) en ajustant longitudinalement la dispersion de vitesse de groupe des FOMs en utilisant une technique de « taperisation » [7]. Ce type de sources blanches, en comparaison aux sources thermiques blanches, offre de nombreux avantages en termes de brillance, de rapport signal-à-bruit, de cohérence spatiale, de compacité...

Des guides de lumière sélectifs en longueur d'onde

L'originalité première des FOMs en termes de guidage se trouve dans le cas des fibres à cœur de bas indice entouré d'un arrangement période de trous d'air ou d'inclusions de haut indice pour lesquelles le confinement de la lumière dans le cœur est assuré grâce à la périodicité de l'indice de réfraction de la gaine. Ce mécanisme de guidage donne naissance à des bandes interdites de propagation de la lumière dans la gaine, autorisant le confinement du champ dans un défaut de la structure qui sert ainsi de cœur pour une propagation longitudinale. L'intérêt historique d'un tel guidage est de pouvoir confiner et guider une forte puissance lumineuse dans l'air afin de repousser le seuil d'apparition des effets non-linéaires et de dommage des fibres à cœur en silice. Une autre application possible de ces FOMs à cœur bas indice est le filtrage sélectif de longueurs d'onde au sein d'une cavité laser. Par ailleurs, l'effet de transmission par bande a également été observé dans d'autres types de fibres microstructurées à cœur creux dites à gaine Kagomé et à gaine tubulaire. Leur mécanisme de guidage diffère

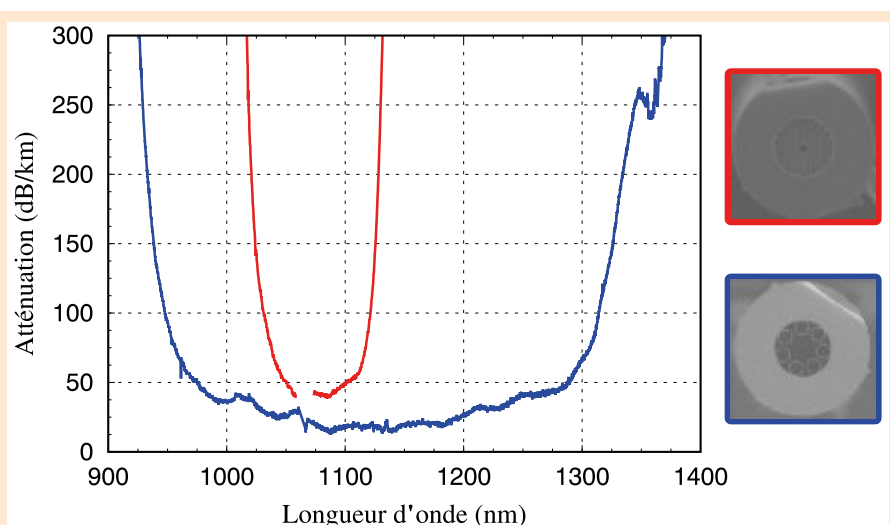


Figure 5. Comparaisons de la largeur de bande de transmission et de l'atténuation issues de fibres microstructurées à cœur creux guidant par bande interdite photonique (rouge) et par couplage inhibé (bleu).

significativement du mécanisme par bande interdite photonique et repose sur un mécanisme de couplage inhibé entre la lumière guidée dans le cœur creux et celle guidée dans la silice, dans les capillaires formant la gaine ou dans les interstices entre les capillaires et les ponts de silice. L'avantage de ces fibres par rapport à celles guidant par bandes interdites photoniques est de présenter des bandes de transmission très larges pouvant s'étendre jusqu'à un octave, des pertes de transmissions plus faibles (*figure 5*) et un très faible recouvrement optique entre le mode de cœur et la silice composant la gaine. Avec de telles performances, ces FOMs sont de parfaites candidates pour le transport de faisceau laser de forte puissance du visible au moyen infra-rouge [6].

Des capteurs à fibres et des lasers à fibres à des longueurs d'onde exotiques

Un des autres aspects séduisants des fibres air/silice réside dans la possibilité d'insérer dans les canaux d'air et/ou dans le cœur creux un gaz ou un liquide [4,6]. Il est alors possible d'accroître significativement l'interaction lumière/matière afin de réaliser des sources lasers fibrées fonctionnant sur des bandes de longueurs d'onde

différentes de celles obtenues avec les terres rares, ou de concevoir des capteurs optiques en influençant les propriétés de guidage de la fibre grâce à une modification des propriétés de l'élément introduit (modification de l'indice effectif des modes liée à une variation de la température par exemple). Dernièrement, différentes études ont démontré le potentiel des fibres à cœur creux, dont le guidage est assuré par un mécanisme de couplage inhibé, pour la réalisation de source laser émettant dans l'UV profond et le proche UV, et également dans le moyen infra-rouge [6].

Des lasers et des amplificateurs à fortes puissances

Les FOMs sont également des candidates idéales pour réaliser des lasers et des amplificateurs à fibres de forte puissance (> 1kW). Avec une

structure à saut d'indice classique, le diamètre du cœur pour une émission monomode ne peut excéder 25 μm . Grâce aux FOMs, des diamètres de champ de mode pouvant atteindre 100 μm sont réalisables tout en conservant un caractère monomode transversal. Cela permet de repousser le seuil d'apparition des effets non-linéaires et de minimiser les risques d'endommagement lié à l'échauffement de la fibre. L'utilisation de la technique d'assemblage-étrirage a également permis de remplacer le revêtement externe fait de polymère de bas indice de réfraction utilisé dans les fibres à double gaine classiques par une couronne de trous d'air afin de confiner l'énergie lumineuse de la pompe optique. Les propriétés mécaniques et thermiques sont ainsi améliorées et l'ouverture numérique de la double gaine peut atteindre des valeurs supérieures à 0,6 alors qu'elles sont au plus égales à 0,48 avec un revêtement en polymère.

Conclusion

Sur une vingtaine d'années, les fibres microstructurées ont démontré l'étendue de leurs possibilités et sont parvenues à susciter l'intérêt de nombreux groupes académiques et industriels. Déjà utilisées dans les capteurs optiques, sources lasers et autres composants dans des domaines d'applications aussi vastes que la bio-photonique, la défense, l'environnement, l'industrie, il ne fait aucun doute que leur champ d'intérêt va encore croître dans les prochaines années pour devenir une brique indispensable dans de nombreux domaines pour l'instant non encore explorés.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] P.V. Kaiser H.W. Astle, *Bell System Technical Journal* **53**, 1021 (1974)
- [2] T.A. Birks, J.C. Knight, P. St. J. Russell, *Optics Letters* **22**, 961 (1997)
- [3] R.F. Cregan et al., *Science*, **285**, 1537 (1999)
- [4] P. St. J. Russell, *Journal of Lightwave Technology* **24**, 4729 (2006)
- [5] F. Couny et al., *Science* **318**, 1118 (2007)
- [6] B. Debord et al., *Fibers* **7** (2019)
- [7] U. Møller et al., *Optical Fiber Technology* **18**, 304 (2012)