

Fibres à cristal photonique : 10 ans d'existence et un vaste champ d'applications



Laurent Bigot
laurent.bigot@univ-lille1.fr

Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules - PhLAM/IRCICA - UMR 8523/FR 3024 – CNRS/Université des Sciences et Technologies de Lille

Philippe Roy
philippe.roy@xlim.fr

XLIM - UMR 6172, CNRS/Université de Limoges

Fibres micro-structurées, fibres à trous, fibres à cristal photonique ou à bandes interdites photoniques... autant d'appellations qui désignent cette jeune branche pourtant vaste de la famille des fibres optiques, qui a vu le jour en 1996 et qui s'est depuis imposée comme une technologie incontournable en Photonique. L'originalité de ces guides d'onde provient de leurs mécanismes de confinement de la lumière qui reposent sur la périodicité de leur structure d'indice. Cette dernière va permettre, dans certains cas, d'utiliser l'air pour propager la lumière dans un cœur de verre ou... d'air. Arrivées à maturité aujourd'hui, ces fibres optiques permettent d'envisager une amélioration significative des composants existants comme ceux qui sont utilisés pour le transport de données jusqu'à l'abonné ou pour la métrologie optique. Elles sont également des candidates sérieuses au développement de sources de puissance pour l'industrie ou de sources fibrées de lumière blanche pour les applications médicales.

En 1996, le groupe d'Optoélectronique de l'Université de Bath publiait la première fabrication d'un nouveau type de fibre optique basé sur la réalisation d'un agencement périodique de trous d'air autour d'un cœur de silice. Ces nouveaux composants optiques, baptisés Fibres à Cristal Photonique (PCF : Photonic Crystal Fibers) en référence à la modulation périodique à l'échelle de la longueur d'onde de leur indice de réfraction, faisaient apparaître des propriétés de propagation singulières, inaccessibles aux fibres conventionnelles. Ainsi, le hasard a permis que la première réalisation présente une géométrie de structure adaptée à l'obtention d'une propagation monomode sur un domaine spectral s'étendant de 450 à 1 550 nm. La propagation monomode se caractérise par un faisceau quasi-gaussien, ce qui facilite grandement son utilisation. Le principe de confinement de la lumière dans le cœur de silice restait, quant à lui, très similaire à celui des fibres conventionnelles, à savoir un mécanisme de réflexion totale interne entre un cœur de haut indice et une gaine micro-structurée d'indice moyen compris entre celui du verre et de l'air (voir *encadré 1*). Très rapidement, le concept de fabrication de ces fibres a été étendu à une seconde famille de fibres micro-structurées pour lesquelles, cette fois, le confinement de la lumière est lié à l'existence de bandes interdites photoniques et s'appuie pleinement sur la périodicité de la structure. Dans ce deuxième cas, la lumière est guidée dans un défaut de la structure périodique (le cœur) dont l'indice

est plus faible que l'indice moyen du milieu qui l'entoure (voir *encadré 1*). Dans le cas le plus extrême, associé à la famille des fibres à cœur creux (Hollow Core), la lumière est confinée dans un trou d'air de la structure. Depuis lors, l'engouement (plus de 1 000 articles publiés depuis 1996) pour ces nouveaux composants n'a fait que croître et les fibres optiques de ces deux familles (que nous regrouperons dans la suite sous le nom de fibres micro-structurées) ont trouvé des applications dans de nombreux domaines aussi bien appliqués (Physique des Lasers, Médecine, Biologie) que fondamentaux (Cryptographie quantique).

Des trous d'air pour guider la lumière

D'un point de vue théorique, les fibres micro-structurées ne représentent qu'une illustration d'un concept théorique plus large, né environ dix ans plus tôt, en 1987 : les cristaux photoniques. Cette notion propre aux photons se propageant dans une structure ordonnée à l'échelle de la longueur d'onde, repose sur l'analogie avec les électrons d'un cristal de semi-conducteur qui, du fait de sa structure ordonnée, ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie quantifiés situés de part et d'autre d'une gamme d'énergie interdite entre bande de conduction et bande de valence. Les cristaux photoniques peuvent donc, d'une certaine façon, être assimilés à des semi-conducteurs de la lumière.

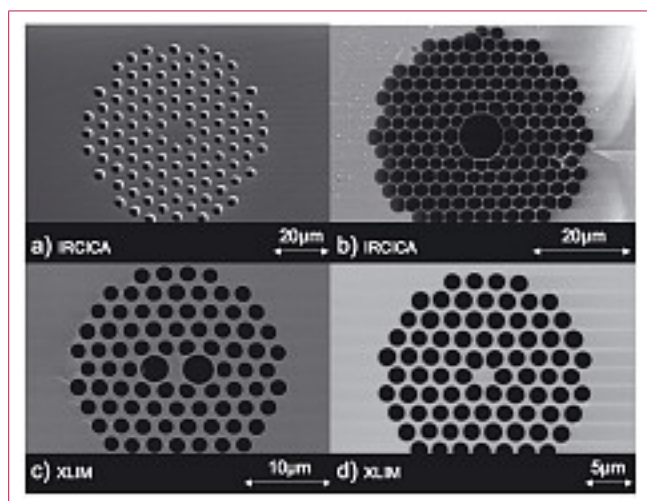


Figure 1 – Photographies MEB (Microscope Électronique à Balayage) de quelques fibres micro-structurées air-silice couramment rencontrées dans la littérature : a) fibre infiniment monomode, b) fibre « hollow-core », c) fibre fortement biréfringente, d) fibre utilisée pour la génération de supercontinuum (voir texte). La silice apparaît en gris et l'air en noir.

La difficulté de fabrication des cristaux photoniques 3D explique pour beaucoup le développement relativement limité de ces structures. Il s'agit en effet de réaliser une structure périodique avec un pas (espacement entre deux motifs) micrométrique et une régularité de l'ordre du pour-cent. Les fibres micro-structurées sont, pour leur part, des cristaux photoniques 2D qui sont conçus à la manière des fibres conventionnelles, c'est-à-dire en étirant homothétiquement un cylindre de verre de taille centimétrique. Dans ce cas, la structure est initialement réalisée à l'échelle du millimètre, ce qui rend la maîtrise de sa géométrie plus aisée. C'est la technique de l'assemblage-étirage (voir *encadré 2*), qui est aujourd'hui la plus répandue. Cette technique a été largement exploitée avec les verres de silice mais quelques réalisations à partir de verres plus exotiques (silice modifiée, chalcogénures) ont également été démontrées. Des techniques alternatives de perçage, d'extrusion ou de moulage ont aussi été proposées. Dans tous les cas, la grande diversité des géométries a permis d'ajuster les propriétés de guidage de façon parfois spectaculaire. Ces propriétés sont principalement dictées par le pas du réseau (Λ) et le diamètre (d) des inclusions de haut/bas indice.

La *figure 1* illustre quelques exemples de structures de fibres qui sont parmi les plus couramment rencontrées aujourd'hui.

Fibre infiniment monomode

Parmi les propriétés spécifiques aux fibres micro-structurées, leur capacité à offrir de nombreux degrés de liberté en matière de gestion de la dispersion d'indice de phase (dépendance spectrale de l'indice effectif des modes guidés – voir *encadré 1*) a donné lieu, à elle seule, à de multiples applications. Ainsi, il est apparu très tôt qu'un choix judicieux des paramètres d et Λ d'une fibre à cœur haut indice peut permettre d'obtenir une propagation monomode (propagation d'un seul mode à la répartition

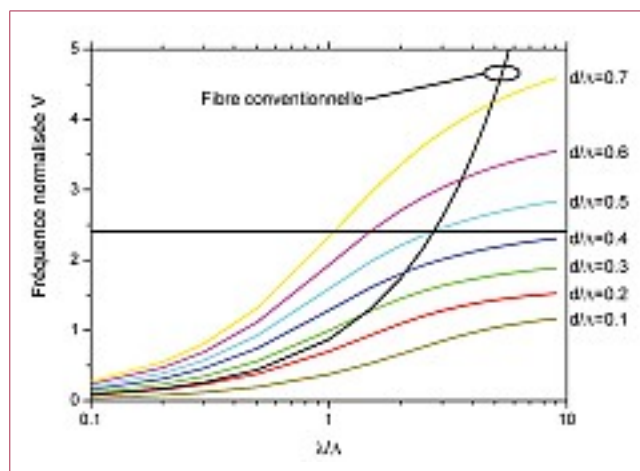


Figure 2 – Illustration de l'influence des paramètres optogéométriques sur la fréquence normalisée V des modes guidés. Lorsque le paramètre V est inférieur à 2.405 (ligne horizontale rouge), le guide est monomode.

d'intensité quasi-gaussienne) sur tout le domaine de transparence de la fibre, soit d'environ 300 nm jusqu'à 2 000 nm. Pour comprendre comment cela est possible, il est nécessaire de rappeler la condition qui dicte l'apparition du premier mode d'ordre supérieur pour un guide donné, c'est-à-dire la longueur d'onde (dite longueur d'onde de coupure λ_c) en-dessous de laquelle le guide devient multimode. Pour cela, on définit le paramètre V , appelé fréquence normalisée, qui s'écrit :

$$V = \frac{\pi d_{\text{cœur}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{gaine}}^2}}{\lambda} > 2.405 \quad (1)$$

où n_{gaine} et $n_{\text{cœur}}$ représentent respectivement l'indice de réfraction de la gaine et du cœur de la fibre. $d_{\text{cœur}}$ représente quant à lui le diamètre du cœur de la fibre. Dans cette expression, le paramètre V est supérieur à 2.405 lorsque la longueur d'onde est inférieure à la longueur d'onde de coupure ($\lambda < \lambda_c$) et le guide est alors multimode. Or, la différence d'indice cœur/gaine dépendant peu de la longueur d'onde, il apparaît ici qu'une fibre conventionnelle devient inévitablement multimode lorsque la longueur d'onde guidée diminue jusqu'à atteindre la longueur d'onde de coupure.

La situation est différente dans le cas d'une fibre à cœur haut indice pour laquelle la condition d'apparition du premier mode d'ordre supérieur s'écrit :

$$V = \frac{\pi d_{\text{cœur}} \sqrt{n_{\text{cœur}}^2 - n_{\text{Geff}}^2(\lambda)}}{\lambda} > 2.405 \quad (2)$$

Ici, l'indice de gaine est remplacé par $n_{\text{Geff}}(\lambda)$ qui représente l'indice effectif de la gaine (i.e., indice effectif du mode le plus bas se propageant dans la gaine (voir *encadré 1*). Comme le montre l'encadré 1, $n_{\text{Geff}}(\lambda)$ présente une dépendance spectrale marquée qui peut contrebalancer la dépendance en longueur d'onde du dénominateur de l'équation 2 et faire en sorte que le paramètre V soit toujours inférieur à 2.405. Ceci est illustré par la *figure 2* qui



Encadré 1

Mécanismes de propagation dans les fibres optiques

Cas des fibres conventionnelles

On entend par fibres conventionnelles les fibres optiques pour lesquelles la lumière est confinée dans une structure

dont l'indice de réfraction est constitué d'un cœur de haut indice entouré d'une gaine d'indice plus bas, comme illustré sur la *figure E1*.

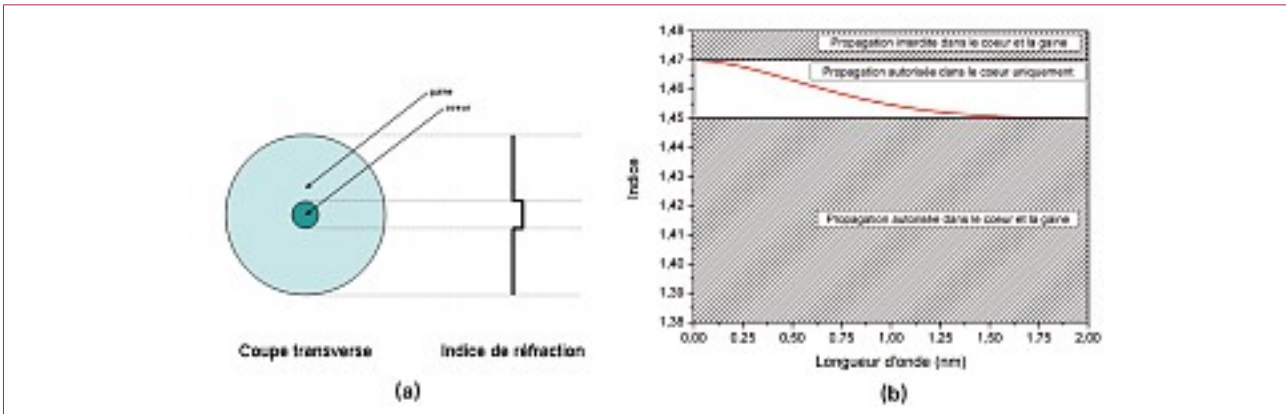


Figure E1 – Fibres conventionnelles.

Le guidage de la lumière dans le cœur repose ici sur le mécanisme de réflexion totale interne, c'est-à-dire que, d'un point de vue géométrique, un rayon lumineux se propageant dans le cœur est totalement réfléchi à l'interface cœur/gaine du fait de la différence d'indice entre les deux milieux.

D'un point de vue ondulatoire, le confinement de la lumière dans le cœur est possible uniquement pour certaines répartitions transverses de l'intensité lumineuse aussi appelées modes. Ces modes représentent les solutions des équations de Maxwell (lois décrivant les dépendances spatiales et temporelles des champs électriques et magnétiques et donc la « réponse optique » d'un milieu) propres à la structure d'indice considérée à la longueur d'onde à laquelle se déroule la propagation. Ces modes constituent donc un ensemble de solutions offertes à la lumière pour se propager dans un guide donné et peuvent être considérés comme une adaptation de la lumière aux contraintes imposées par le guide. Chaque mode se propage à une vitesse propre dépendant autant de la forme du guide que des indices de réfraction des différents matériaux qui le constituent. On associe alors à

chaque mode une constante de propagation propre ainsi qu'un indice effectif, qui peut être assimilé à l'indice de réfraction « vu » par la lumière se propageant selon ce mode et qui varie entre l'indice du cœur (aux courtes longueurs d'onde, là où la lumière est très confinée dans le cœur) et l'indice de la gaine. Seuls les modes d'indice effectif compris entre ces deux valeurs peuvent être confinés dans le cœur, et c'est notamment le cas du mode fondamental dont la courbe de dispersion d'indice (variation de l'indice effectif du mode avec la longueur d'onde) est représentée en rouge sur la *figure E1b* (les indices du cœur et de la gaine sont choisis égaux à 1.47 et 1.45 respectivement).

Cas des fibres micro-structurées

Fibres à cœur de haut indice

Ces fibres peuvent être schématisées par un agencement périodique d'inclusions de bas indice entourant un défaut (absence d'inclusion) qui sert de cœur.

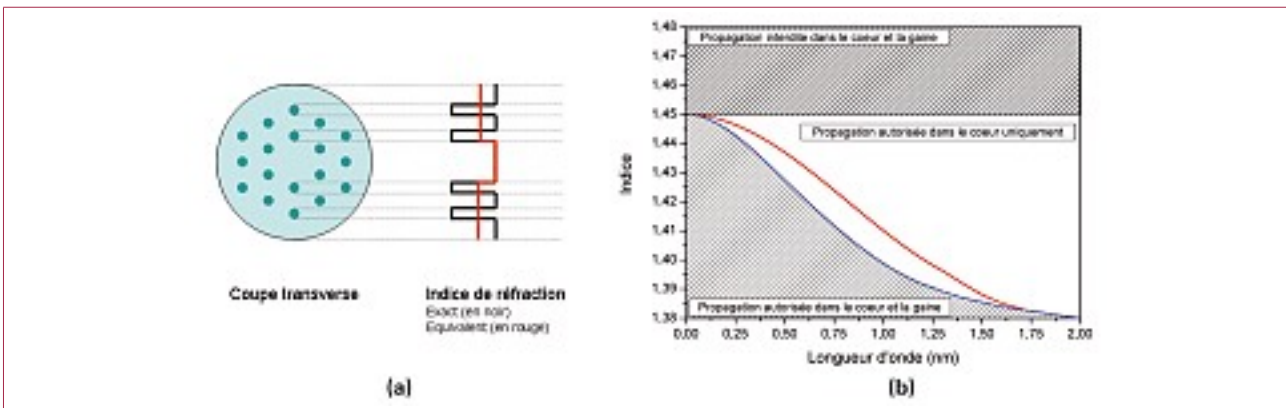


Figure E2 – Fibres à cœur de haut indice.



Encadré 1

Mécanismes de propagation dans les fibres optiques (suite)

Malgré la présence d'une gaine micro-structurée, il est possible d'assimiler l'indice de cette gaine à un indice moyen n_{Geff} , qui correspond en pratique à l'indice effectif du mode de plus haut indice effectif autorisé à se propager dans la gaine. On retrouve donc une situation similaire à la précédente avec une différence d'indice cœur/gaine $n_C - n_{Geff}$ et donc un confinement possible dans le cœur par un mécanisme de réflexion totale interne modifiée du fait de la nature de la gaine. Il convient de noter que les paramètres optogéométriques de la structure ont un impact considérable sur la valeur et la courbe de dispersion d'indice de n_{Geff} (en bleu sur la courbe

de la *figure E2b*). Dès lors, les modes guidés (dont un exemple est représenté en rouge sur la *figure E2a*) présentent également des propriétés de dispersion d'indice pouvant être très marquées ce qui est à l'origine d'une grande partie des propriétés des fibres micro-structurées.

Fibres à cœur de bas indice

Ces fibres peuvent être schématisées par un agencement périodique d'inclusions de haut indice entourant un défaut (absence d'inclusion) qui sert de cœur.

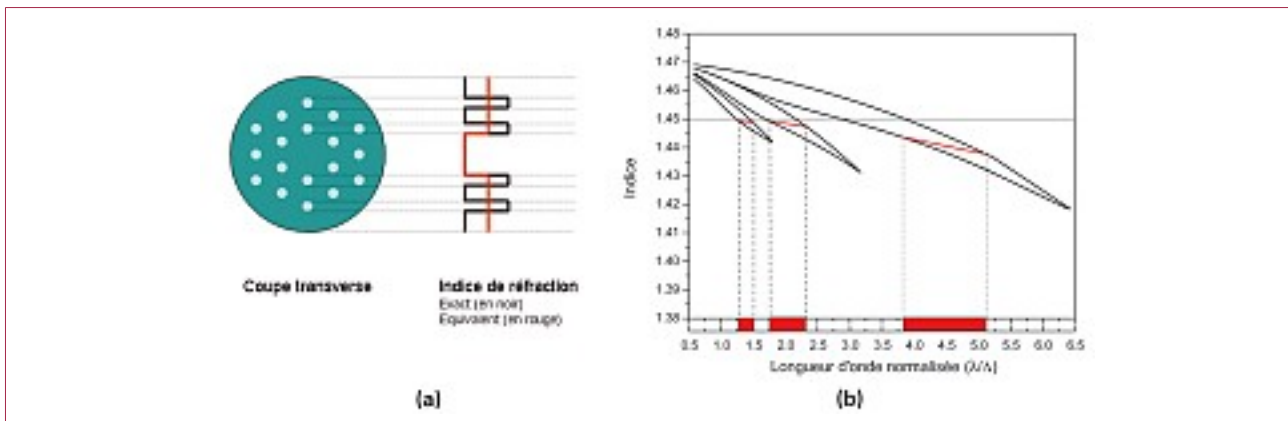


Figure E3 – Fibres à cœur de bas indice.

Ici, la périodicité de la structure est à l'origine du confinement du mode dans le cœur. En effet, la structure périodique d'indice conduit à la formation de bandes interdites d'énergie pour une structure périodique infinie. Ainsi, certaines longueurs d'onde ne peuvent se propager dans la gaine micro-structurée. Dès lors, si l'on introduit dans la structure un défaut pouvant supporter un mode dont l'indice effectif est inférieur à celui du cœur et se trouve dans la bande interdite (représenté en rouge sur la *figure E3b*), la lumière se trouvera confinée transversalement dans ce défaut et ce mode sera autorisé à se propager le long de la fibre. Ce confinement n'étant possible que pour certaines gammes de longueurs d'onde, on observe alors des discontinuités dans la courbe de dispersion d'indice et donc

dans la courbe de transmission. Ceci est illustré par les rectangles rouges sur la *figure E3b* qui symbolisent les domaines de longueurs d'onde permises à la propagation pour le diagramme de bandes interdites considéré. Il convient de noter que l'indice effectif de ce mode est nécessairement inférieur à l'indice du défaut, ce qui signifie que l'indice effectif du mode guidé dans une fibre à cœur d'air est inférieur à 1. À la différence des composants photoniques pour lesquels la lumière se propage transversalement à la micro-structuration (guides photoniques planaires), la différence d'indice entre les éléments de la structure périodique d'une fibre, où la lumière se propage longitudinalement à la micro-structuration, peut être faible, typiquement de l'ordre de quelques 10^{-3} .

représente comment le rapport d/Λ d'une fibre à cœur haut indice conditionne le respect de la contrainte décrite par l'équation 2. On constate ainsi que la propagation dans une fibre présentant un rapport d/Λ inférieur ou égal à 0.4 est toujours monomode.

Propagation et génération de supercontinuum

La forte dispersion d'indice de phase peut également avoir une influence sur la dépendance spectrale de la vitesse de groupe v_g . On introduit alors la notion de dispersion chromatique, D (ou dispersion de vitesse de

groupe), qui décrit la variation de vitesse de propagation avec la longueur d'onde :

$$D = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{eff}}{\partial \lambda^2} \quad (3)$$

où L représente la longueur de la fibre, n_{eff} l'indice effectif du mode guidé, λ la longueur d'onde et c la vitesse de la lumière dans le vide.

Ainsi, l'enveloppe temporelle d'une impulsion lumineuse (nécessairement composée de plusieurs longueurs d'onde) peut être modifiée en cas de dispersion chromatique non nulle.



La dispersion chromatique est liée, d'une part, à la dispersion du matériau constituant le guide et, d'autre part, à la structure d'indice du guide lui-même. C'est cette deuxième contribution qui peut être ajustée finement dans le cas des fibres micro-structurées et qui permet d'obtenir des dispersions de vitesses de groupe élevées ou nulles sur un grand domaine de longueur d'onde. Il est ainsi possible de positionner le zéro de dispersion chromatique ($D = 0$) à proximité d'une longueur d'onde choisie et notamment dans le visible, chose impossible avec une fibre monomode conventionnelle où la dispersion chromatique est très marquée par la contribution du matériau. Cet ajustement de la longueur d'onde de dispersion nulle est particulièrement important si l'on souhaite limiter l'élargissement temporel d'une impulsion lumineuse au cours de sa propagation. C'est en particulier le cas lorsqu'on souhaite générer un supercontinuum, c'est-à-dire un spectre large, continu et intense, en propageant une impulsion lumineuse puissante à travers un matériau non-linéaire.

Les fibres micro-structurées à cœur haut indice se sont imposées comme les matériaux idéaux pour ce type de réalisation grâce à cette flexibilité qu'elles offrent en matière d'ajustement du zéro de dispersion chromatique. Dès lors, un faisceau suffisamment intense dans une fibre de géométrie adaptée va donner naissance à de nouvelles fréquences grâce à la contribution d'effets de diffusion non-linéaires élastiques (type Kerr) ou inélastiques (effet Raman). Il est alors possible, en utilisant, par exemple, les impulsions nanosecondes d'un micro-laser déclenché à 1 064 nm, d'obtenir en sortie de quelques dizaines de mètres de fibre un « laser blanc » qui couvre la gamme 400-2 000 nm avec une puissance typique de l'ordre de 1 mW/nm. En associant la cohérence spatiale d'un faisceau laser à l'étendue spectrale d'une source blanche, de nombreux avantages émergent par rapport aux solutions traditionnelles tels que compacité, brillance, coûts réduits, simplicité... Ceci est illustré par la *figure 3*. En outre, il apparaît que le spectre obtenu est en fait constitué de millions de raies individuelles, espacées d'une fréquence égale au taux de répétition du laser utilisé pour générer le supercontinuum. Un tel peigne de fréquence s'avère alors être un outil particulièrement performant en métrologie.

Un vaste champ d'applications

Lasers de puissance à fibres

En plus des applications directement liées aux télécommunications, les fibres optiques conventionnelles ont également su s'imposer en physique des lasers en offrant des sources lumineuses robustes, puissantes et compactes couvrant un large domaine de longueur d'onde, notamment dans le proche infrarouge. Ainsi, la grande qualité géométrique du faisceau émis par un laser à fibre peut permettre sa focalisation sur des surfaces extrême-

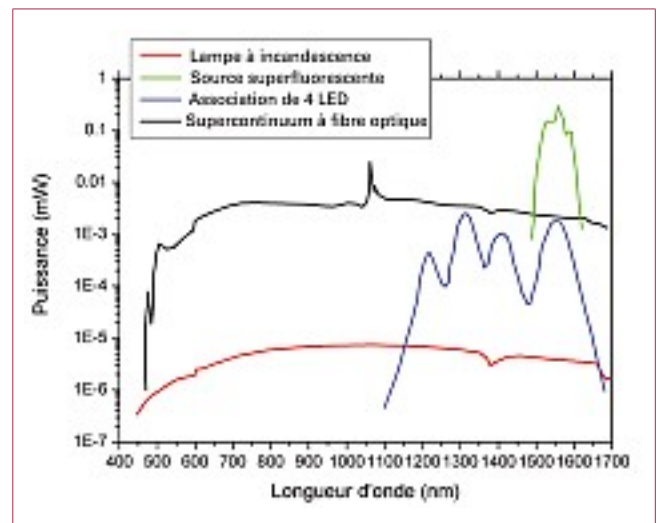


Figure 3 – Comparaison des spectres de large-bande issus de différentes sources fibrées. Le supercontinuum issu d'une fibre micro-structurée à cœur haut indice est celui qui offre le meilleur compromis largeur-puissance.

ment petites, de l'ordre de quelques μm^2 . Dans ce cas, l'interaction entre un faisceau laser très intense et la matière peut conduire à des modifications de sa structure pouvant aller jusqu'à la sublimation très localisée du matériau dans le volume du faisceau laser. Ainsi, le bistouri laser, précis et stérile, commence à apparaître en médecine alors que l'industrie exploite plutôt des applications telles que la gravure, le perçage, la découpe ou la soudure d'extrême précision.

De manière simple, un laser est constitué d'une cavité résonnante contenant un milieu actif amplificateur qui, lorsqu'on lui apporte de l'énergie sous forme électrique ou lumineuse, la restitue sous forme d'un faisceau de photons très intense. Dans le cas d'une fibre optique, le milieu actif peut être la fibre elle-même si le verre qui la constitue est préalablement dopé avec des ions luminescents. Les solutions privilégiées en la matière sont les ions de terres rares (erbium, ytterbium, thulium, holmium, néodyme) et la cavité peut alors être constituée de la fibre ainsi réalisée placée entre deux miroirs qui, dans certains cas, peuvent même être localisés au cœur de la fibre (miroirs dits de Bragg).

Pour coupler un maximum de puissance dans la fibre en exploitant les solutions à base de barrettes de diodes par exemple, les géométries de fibres ont évolué vers des structures dites « double gaine » où deux guides concentriques sont utilisés pour guider la pompe et le signal. Ceci est illustré par la *figure 4*.

La structure guidante séduit en apportant une grande qualité de faisceau, une bonne efficacité de pompage et donc un très bon rendement énergétique, une excellente dissipation thermique et une flexibilité qui fait souvent défaut aux lasers massifs lourds et encombrants. Pour accéder à de très fortes puissances, la fibre, en revanche, est limitée du fait de son faible volume actif et du confinement élevé des champs guidés, le diamètre du cœur étant

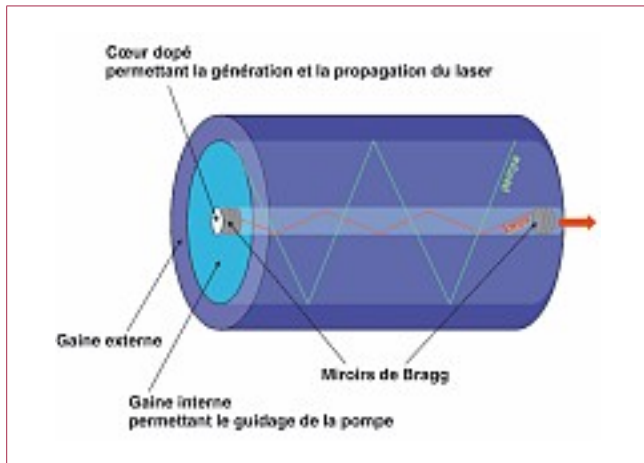


Figure 4 – Schéma d'une structure de fibre dite « double gaine ».

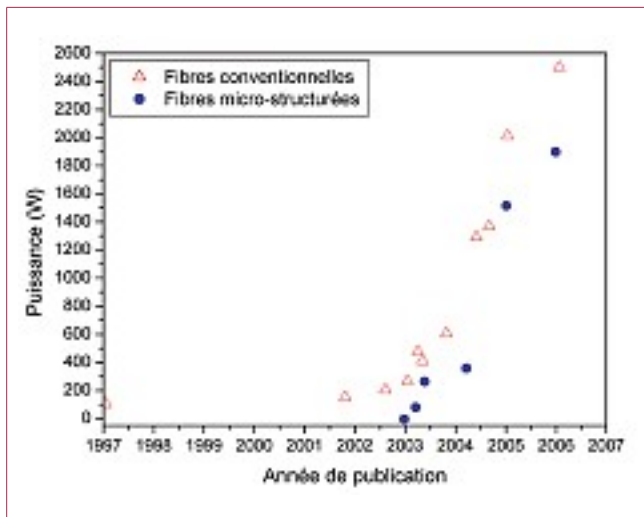


Figure 5 – Représentation de la croissance de la puissance disponible en sortie des systèmes à fibres au cours des dernières années. Seules sont reportées les fibres monomodes.

compris entre quelques μm et quelques dizaines de μm . Les fortes densités de puissance favorisent l'apparition d'effets non linéaires qui dégradent le rendement énergétique ainsi que les caractéristiques spectrales et temporelles de ces sources. Ces effets, recherchés pour étendre le spectre des sources « type supercontinuum » (voir paragraphe précédent), sont à proscrire dans les lasers usuels où les propriétés de cohérence spatiales et temporelles sont souhaitées. Pourtant, les niveaux de puissance émis par certains lasers à fibre dépassent aujourd'hui allègrement le kilowatt en régime d'émission continu et les fibres micro-structurées prennent aujourd'hui le relais des fibres conventionnelles pour poursuivre cette montée en puissance (figure 5).

Pour contourner les difficultés mentionnées, les fibres micro-structurées disposent d'atouts importants, en particulier pour repousser le seuil d'apparition des effets non linéaires ou pour minimiser l'échauffement de la fibre. Les densités spatiales de puissances extrêmes qui peuvent être atteintes dans le cœur d'un laser à fibre, responsables des dégradations spectrales et spatiales citées, peuvent

être limitées en augmentant la surface du cœur qui doit cependant demeurer monomode. Pour ce faire, la différence d'indice cœur/gaine doit alors être très faible comme le montre l'équation 1. Avec une structure à saut d'indice classique, le diamètre du cœur, pour une émission monomode, excède rarement $25 \mu\text{m}$ car il est extrêmement difficile d'obtenir de très faibles différences d'indice cœur/gaine avec les techniques de fabrication de fibres conventionnelles. En utilisant la technique de l'assemblage étirage (voir encadré 2), la différence d'indice cœur/gaine peut être maîtrisée jusqu'à des valeurs aussi faibles que 10^{-4} grâce à un ajustement précis du diamètre des trous dans la gaine. La propagation d'un mode unique a ainsi été obtenue dans un cœur de plus de $100 \mu\text{m}$ de diamètre, soit un diamètre dix fois supérieur à celui d'un cœur de fibre standard.

Nouvelles sources de lumière

Outre les lasers, de nombreuses applications font aujourd'hui appel à l'utilisation des sources optiques non conventionnelles comme les sources « type supercontinuum » émettant un rayonnement multi-longueur d'onde et couvrant un domaine spectral important : la microscopie à haute résolution spatiale appliquée à l'analyse de tissus biologiques, le diagnostic hématologique unicellulaire par technique spectroscopique ou diffractive, la détection de polluants atmosphériques, la caractérisation d'éléments optiques en sont quelques exemples.

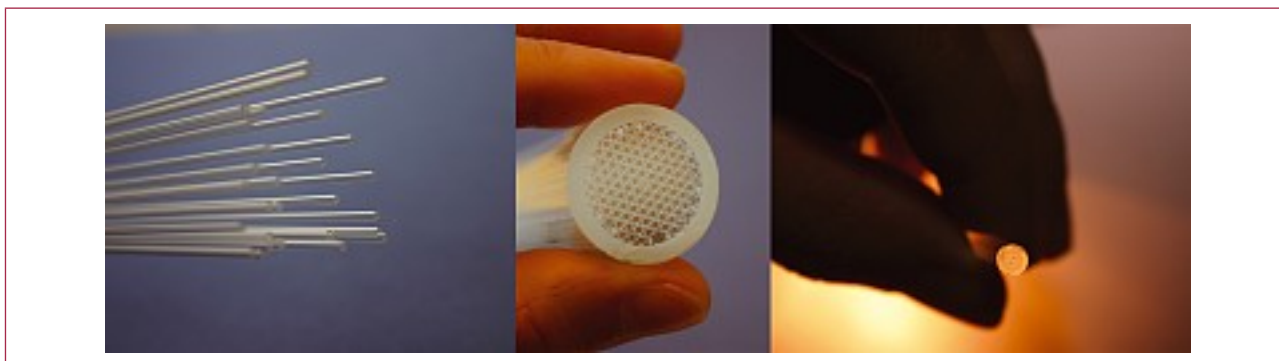
Pour ce type de sources, la fibre non-linéaire, lieu des conversions de fréquences, est le plus souvent exclusivement passive. Plus ces conversions sont efficaces, plus le spectre est étendu. La puissance émise sur l'ensemble du spectre étant limitée par celle des impulsions pompes injectées dans la fibre, la densité spectrale de puissance demeure elle-même limitée. Du fait de la très faible dimension du cœur (aire modale typiquement de l'ordre de $4 \mu\text{m}^2$), il est difficile d'augmenter la puissance des impulsions incidentes car celle-ci est très proche du seuil de dommage du matériau constituant la fibre. L'application d'usinage vantée précédemment constitue ici un problème majeur puisqu'elle s'applique à la face d'entrée de la fibre optique dans laquelle les conversions de fréquences devraient être réalisées. La grande flexibilité offerte par la méthode de fabrication des fibres micro-structurées peut alors être exploitée afin d'incorporer au sein de la fibre non-linéaire, un cœur actif amplificateur (dopage ytterbium dans le cas d'un pompage à 1064 nm) combiné à une gaine externe à forte proportion d'air permettant la propagation d'une puissance de pompage élevée.

La structure à double gaine décrite sur la figure 4 est alors réalisée en utilisant une micro-structuration différente pour la gaine entourant immédiatement le cœur et pour la gaine périphérique. La figure 6 montre une image de la face d'une fibre à double gaine structurée. La puissance crête des impulsions, à l'origine des effets non linéaires alimentant le spectre large, est alors entretenue,



Encadré 2

Fabrication de fibres micro-structurées par la méthode d'assemblage-étirage

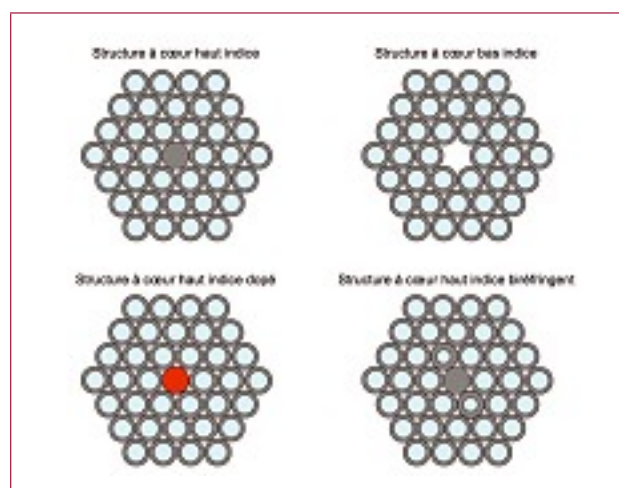


La technique de l'assemblage-étirage est probablement la plus répandue aujourd'hui, notamment dans le cas des fibres micro-structurées en silice. Le principe consiste à assembler en botte (le plus souvent hexagonale car c'est la géométrie correspondant à l'empilement naturel de cylindres) des capillaires (tubes de verre de 1-2 mm de diamètre) et à insérer cette botte dans un tube de quelques centimètres de diamètre assurant le maintien de l'assemblage. La botte est ensuite étirée directement sous forme de fibre optique ou pré-étirée, manchonnée et finalement fibrée afin de réduire encore les dimensions transverses de la microstructure. Pour obtenir la fibre optique, on utilise un équipement très similaire à celui qui est mis en œuvre pour les fibres conventionnelles, à savoir une tour verticale de plusieurs mètres de haut qui dispose dans sa partie supérieure d'un four à haute température (une température de l'ordre de 2 000 °C est nécessaire pour faire couler la silice) dans lequel on descend progressivement la préforme. Dans sa partie basse, la tour dispose d'un cabestan ayant pour fonction d'étirer la fibre. Le rapport des vitesses entre la descente de préforme et le cabestan permet une réduction homothétique de la préforme jusqu'à un diamètre voisin de 100 μm .

Pour réaliser les capillaires, matière première de l'assemblage, on étire, sur un équipement similaire mais avec un facteur d'étirage moins important, un tube de verre de quelques centimètres de diamètre.

L'intérêt majeur de la technique d'assemblage-étirage réside dans la grande souplesse qu'elle autorise au moment de

l'assemblage. En effet, si les capillaires à assembler ont le même diamètre, il est possible de réaliser des structures à diamètre de trous variables (par exemple, au sein de la même couronne pour briser la symétrie hexagonale du cœur et donner à la fibre un caractère biréfringent), à cœur de silice pure ou de silice dopée (pour réaliser une fibre optiquement active, c'est-à-dire susceptible d'amplifier la lumière). Ceci est illustré par la figure ci-dessous qui représente différentes possibilités offertes au cours d'un même assemblage.



voire augmentée dans le cœur central. Le transfert de puissance vers le spectre large s'opère donc sur une longueur de fibre plus importante, ce qui permet une augmentation significative des densités spectrales de puissance émises, en particulier dans le domaine visible (lorsque la conception de la fibre le permet) comme le montre la *figure 6*.

Des guidages originaux

Comme cela a été présenté dans l'*encadré 1*, une réelle originalité en matière de guidage de la lumière existe dans le cas des fibres micro-structurées à cœur bas indice pour

lesquelles le confinement de la lumière dans le cœur est assuré grâce à la structure d'indice périodique de la gaine. Ce mécanisme de guidage donne naissance à des bandes interdites de propagation de la lumière dans la gaine, ce qui autorise le confinement du champ dans un défaut de la structure périodique qui servira de cœur pour une propagation longitudinale. Dans le cas des fibres « Hollow core », ce défaut peut être uniquement un trou d'air et le confinement du mode peut être réalisé tout en ayant plus de 99 % de la puissance guidée dans l'air (voir *figure 7*).

L'intérêt de tels guidages est, notamment, d'augmenter le seuil d'apparition des processus non-linéaires par rapport à une fibre à cœur de silice.



Par ailleurs, du fait des faibles contrastes d'indice nécessaires à son observation dans le cas des fibres, l'effet de bande interdite photonique peut également être observé dans des structures toutes solides où la gaine est constituée d'un assemblage périodique de plots de silice dopée au germanium (ce dernier, utilisé pour la réalisation de fibres conventionnelles, a pour effet d'augmenter l'indice de réfraction de la silice). Ces structures sont fabriquées par la méthode d'assemblage-étirage décrite dans l'*encadré 2* en remplaçant simplement les capillaires par des cannes de silice dopée au germanium. Elles présentent l'intérêt de pouvoir coupler la propagation par bande interdite à un cœur solide pouvant être dopé par des ions luminescents pour réaliser des composants actifs optiquement. Dans ce cas, l'intérêt est de pouvoir favoriser, au sein de la cavité laser elle-même, certaines émissions au détriment d'autres en jouant sur les pertes introduites aux différentes longueurs d'onde. Un exemple d'une telle structure est présenté sur la *figure 8*.

Perspectives pour les dix prochaines années

Évolution du matériau

Les travaux menés ces dix dernières années ont mis à jour un ensemble de propriétés innovantes principalement liées à l'interaction entre les champs lumineux propagés et la structuration air/silice à l'échelle micrométrique. Bien que quelques fabrications de fibres micro-structurées aient été réalisées à partir d'autres matériaux que la silice, la grande majorité des travaux a consisté à comprendre, développer et exploiter l'extraordinaire potentiel offert par la géométrie des structures. La méthode de fabrication par assemblage-étirage a largement contribué à cet engouement en permettant d'utiliser un grand nombre de degrés de liberté supplémentaires lors de la fabrication des fibres. Cependant, bien que le potentiel exceptionnel de ces guides ait été mis en lumière, il semble que ce soit du côté du matériau qu'il faille chercher les évolutions à venir. En ce qui concerne la silice, cette évolution devra permettre, pour les applications de transport sur de longues distances, d'amener les pertes des fibres micro-structurées en silice à un niveau comparable à celui des fibres conventionnelles.

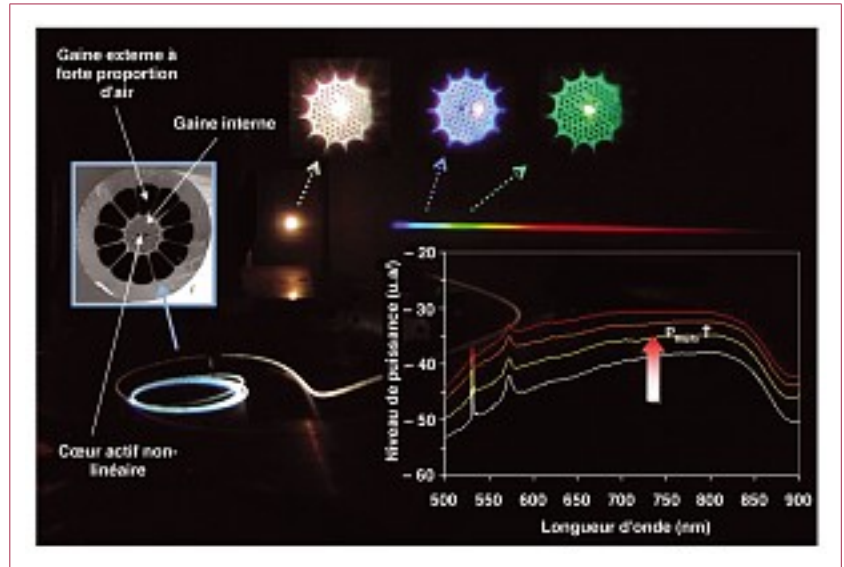


Figure 6 – En haut à gauche : photographie MEB de la fibre non-linéaire active avec gaine micro-structurée (gestion des caractéristiques non-linéaires) et gaine d'air externe pour le guidage de la puissance de pompage continue (gestion du gain). En bas à droite : évolution de la partie visible du spectre émis par la fibre en fonction de la puissance de pompage continue injectée dans la gaine extérieure.

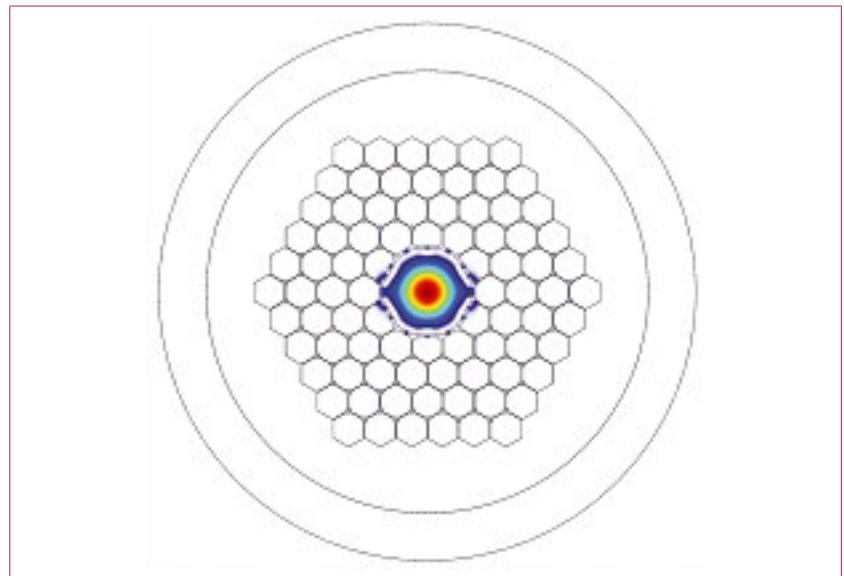


Figure 7 – Modélisation de la répartition transverse de l'intensité lumineuse correspondant au mode fondamental d'une fibre à cœur creux. La structure de silice apparaît en noir et l'air en blanc.

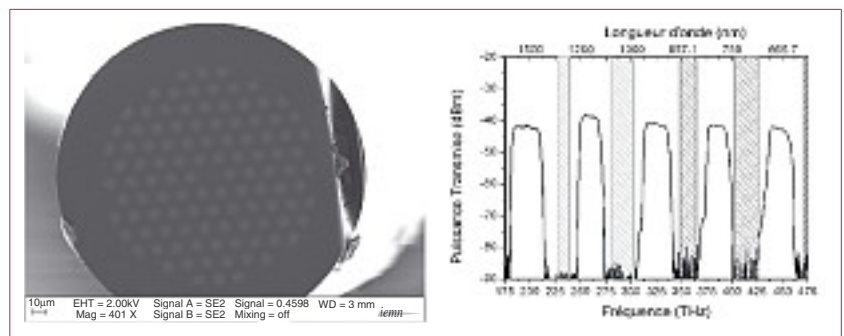


Figure 8 – À gauche : photographie MEB d'une fibre toute solide à bande interdite photonique. Les zones claires correspondent à des plots de silice dopée au germanium. Le reste de la structure est uniquement constitué de silice. À droite : spectre de transmission de la fibre illustrant l'existence de bandes interdites photoniques pour le cœur (zones hachurées).

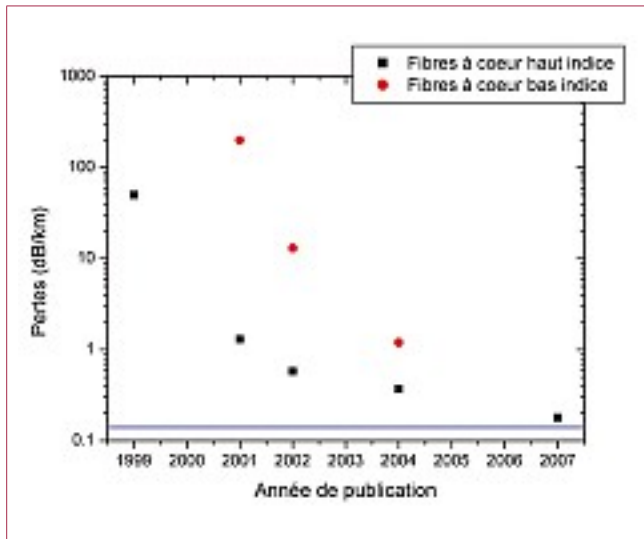


Figure 9 – Évolution des pertes de fond dans les fibres micro-structurées à cœur haut indice et cœur bas indice. À titre de comparaison, le record de pertes dans les fibres conventionnelles se situe autour de 0.14 dB/km. Il est symbolisé par la ligne horizontale bleue.

Comme l'illustre la *figure 9*, l'objectif est presque atteint pour certaines géométries de fibres à cœur haut indice mais un ordre de grandeur reste à gagner en ce qui concerne les fibres à cœur bas indice comme les fibres Hollow-Core. Ces pertes élevées font que, dans le domaine des télécommunications, les fibres conventionnelles vont très probablement rester les composants privilégiés pour les transmissions très longues distances comme les liaisons transocéaniques. Les fibres micro-structurées, quant à elles, permettront de réaliser des fonctions optiques locales ou des transmissions sur des distances plus courtes en tirant parti de leurs propriétés singulières.

Parallèlement, de nombreuses applications en dehors du domaine des télécommunications imposent de travailler dans des gammes spectrales telles que l'infrarouge lointain (au-delà de $3 \mu\text{m}$ pour certaines applications environnementales et militaires) ou le visible et l'UV (biologie, hématologie, spectroscopie, détection de polluants). Or, à ces longueurs d'onde, la transparence de la silice est relativement médiocre, ce qui laisse penser que l'usage de la silice, quasi exclusif aujourd'hui, va probablement céder du terrain face au développement de nouveaux matériaux plus transparents dans les domaines spectraux concernés, même si les structures à cœur creux pour lesquelles le mode est très largement confiné dans l'air, présentent une alternative intéressante. L'utilisation de matériaux alternatifs en remplacement ou en complément de la silice pure est d'ores et déjà amorcée. En plus de propriétés de transparence parfois complémentaires à celles de la silice, l'intérêt de l'utilisation de verres telles que les tellures (oxyde de tellure) ou les chalcogénures (verres à base de soufre) réside dans le fait qu'ils présentent des coefficients non-linéaires bien supérieurs à ceux de la silice ce qui, combiné à une géométrie adaptée, per-

met de réaliser des effets non-linéaires pour une longueur de fibre bien plus courte qu'une fibre réalisée en verre de silice.

Interaction lumière/matière

Un autre aspect séduisant des fibres air/silice réside dans la possibilité qu'elles offrent d'insérer dans les canaux d'air un gaz, un liquide ou même une particule. Dans les deux premiers cas, il est alors possible d'accroître significativement l'interaction lumière/matière et d'influer sur les propriétés de guidage grâce à une modification des propriétés du gaz ou du liquide (modification de l'indice effectif des modes liée à une variation de température ou un changement d'orientation de cristaux liquides). Les fibres micro-structurées apparaissent alors comme le lieu privilégié d'interactions fortes entre onde propagée et liquide/gaz à analyser, lorsque ce dernier est introduit au plus près du cœur dans les micro-canaux de la fibre. Dans le domaine biomédical (mesures *in vitro* ou *in vivo* de produits sanguins, chromatographie, micro-cultures biologiques...), environnemental (détection de polluants, surveillance de la qualité de l'eau, de l'air...), c'est le concept « lab in fiber » qui pourra ainsi être développé, la détection d'un composé chimique pouvant alors se faire grâce à l'utilisation de polymères chimio-sélectifs par exemple, qui rempliraient ou tapisseraient les micro-canaux des fibres structurées afin d'obtenir une proximité inégalable.

En présence du composé ou de la molécule à détecter, l'indice de réfraction du polymère chimio-sélectif change et la mesure par voie optique peut exploiter une variation de la réponse spectrale de la fibre. Ces propriétés sont étroitement liées à celles qui sont développées pour le domaine des capteurs, domaine dans lequel il est reconnu que les propriétés structurelles des fibres optiques leur confèrent un intérêt indéniable : immunité électromagnétique pour travailler en milieu perturbé de par la nature diélectrique du matériau, faibles effets d'inclusion du fait de leur très petite section, report des mesures à grande distance... Des micro-capteurs (non ou faiblement intrusifs du fait des faibles dimensions transverses des fibres), éventuellement multiplexés spatialement et interrogés à distance ont déjà été proposés pour l'industrie (pétrochimie, contrôle de l'élaboration des matériaux composites) ou la surveillance d'ouvrages d'art. Les fibres optiques micro-structurées permettront de réaliser des avancées notables en autorisant, par exemple, des mesures simultanées de déformations et de variations de températures, réparties sur toute la longueur de la fibre à très haute résolution. Pour de telles applications, les contraintes relatives à la conception des fibres sont doubles. Elles doivent permettre l'exploitation des propriétés de propagation requises par le procédé de mesure optique tout en favorisant la pénétration dans les canaux d'air des produits à analyser (contraintes sur la taille des canaux et sur leur accès).



En dix ans, les fibres micro-structurées ont su démontrer l'étendue de leurs possibilités et sont parvenues à susciter l'intérêt de nombreux groupes académiques et industriels. Capteurs, sources de lumière, composants pour les télécommunications sont autant de domaines où l'utilisation de ces fibres optiques d'un nouveau genre n'est plus à démontrer et nul ne doute que toutes les possibilités offertes n'ont pas encore été explorées. Ce sera très certainement un des enjeux des dix prochaines années que de faire de ces fibres des éléments à même d'être intégrés dans les futurs réseaux de télécommunication et d'accroître leurs performances par l'étude de nouvelles géométries combinées à de nouveaux matériaux.

Pour en savoir plus

Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.S., Roberts P.J. & Allan D.C., « Single-mode photonic band gap guidance of light in air », *Science*, 285, 1537, 1999.

Russell P. St. J., « Photonic crystal fibers », *Science*, 299, 358, 2003.

Bjarklev A., Broeng J. & Bjarklev A.S., « Photonic Crystal Fibres », Kluwer Academic Publishers, 2003.

Ont également contribué à ce travail : M. Douay, G. Bouwmans, Y. Quiquempois, A. Kudlinski, M. Perrin, G. Martinelli, K. Delplace, A. Le Rouge, J.-M. Blondy, J.-L. Auguste, P. Martin, C. Restoin, P. Leproux, G. Humbert, S. Février et les étudiants des deux équipes.