HAL
open science

Le développement des fibres optiques de silice

Wilfried Blanc

To cite this version:

Wilfried Blanc. Le développement des fibres optiques de silice. Matériaux et Techniques, 2013, 101 (7), pp.23. hal-01081774

HAL Id: hal-01081774

https://hal.science/hal-01081774v1

Submitted on 11 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Article de revue

Le développement des fibres optiques de silice

Par Wilfried Blanc[1]

La silice, de par ses propriétés remarquables, est un verre de référence pour de nombreuses applications. En particulier, ses propriétés de transparence ont permis de préparer très tôt des éléments d'optique tels que des lentilles ou des miroirs. Mais pour pouvoir mettre à profit le guidage de la lumière, reporté dès 1842, dans des fibres optiques de plusieurs kilomètres, des procédés spécifiques de préparation ont du être développés pour atteindre l'ultra-transparence. Depuis, le développement des fibres optiques est tel que l'accès au haut débit ne représente que le sommet visible du grand public d'un iceberg d'applications.

La silice, de formule chimique SiO_2, est un matériau constitué de tétraèdres de SiO_4 liés par les atomes d'oxygène. Elle est très présente à l'état naturel, aussi bien dans les minéraux (croûte terrestre) que chez les végétaux (les prêles ou les diatomés) ou les animaux (les éponges ou les radiolaires). C'est un verre (arrangement désordonné des tétraèdres) qui est aussi produit industriellement car il possède des propriétés remarquables (résistance aux hautes températures, aux chocs thermiques, isolation électrique, …) et l'abondance naturelle de la matière première permet d'assurer un prix de revient compétitif. Si les propriétés de transparence ont permis d'utiliser très tôt ce matériau pour préparer des éléments d'optique tels que des lentilles ou des miroirs, l'avènement des fibres optiques de silice, raconté dans cet article, représente l'aboutissement d'un développement de haute technologie.

Les pionniers

L'histoire du guidage contrôlé de la lumière commence en 1841, de manière imprévue. À Genève, J.D. Colladon souhaite présenter une découverte récente de F. Savart : l'existence d'une instabilité conduit un jet d'eau à se briser en gouttes après quelques centimètres d'écoulement [1]. La piètre luminosité de la salle le conduit à éclairer son montage à l'aide de miroirs. Illuminant le réservoir d'eau, il constate que la lumière se propage dans le jet d'eau. Suite à cette observation, il envoie un rapport à F. Arago, président de l'Académie des Sciences. Ce dernier se souvient que J. Babinet a observé un phénomène similaire et le sollicite pour écrire aussi un article. Les deux compte-rendus paraissent en 1842 mais le sentiment vis-à-vis de cette découverte est très contrasté entre les deux auteurs [2, 3]. Pour J.D. Colladon, il s'agit d'«une des plus belles et des plus curieuses expériences que l'on puisse faire dans un cours d'optique ». Son enthousiasme est à la hauteur de celui soulevé par les fontaines lumineuses initiées par ses travaux. Ces spectacles aquatiques forcent l'admiration d'un public habitué à l'éclairage à la bougie ou aux lampes à gaz, la lampe à incandescence n'arrivant que trente ans plus tard. J. Babinet quant à lui soumet son article à la demande de F. Arago. Il rapporte le guidage de la lumière, non pas dans un jet d'eau mais dans une « tige de verre courbée d'une manière quelconque ». Deux raisons le poussent à la réserve quant à la nouveauté de cette observation. Premièrement, le verre est travaillé depuis des siècles. Sa préparation et sa mise en forme nécessitent de le chauffer. Il est fort probable que la plupart des verriers aient déjà observé la lumière du foyer illuminer l'extrémité d'un verre étiré. Deuxièmement, le piégeage de la lumière dans un barreau de verre (ou un jet d'eau) s'explique très facilement à partir des équations de Snell-Descartes, déjà vieilles de plus de deux siècles (voir l'encadré). Il mentionne toutefois dans son article deux exemples d'applications de ce guidage : un tel barreau de verre courbé pourrait être utilisé pour déporter une source de lumière et permettre d'éclairer l'intérieur de la bouche ou les préparations d'un microscope. J. Babinet ne s'intéressera plus à ce phénomène après la publication de son article. Pourtant, ces deux idées seront appliquées des années plus tard (1888 pour l'usage médical et 1920 pour les microscopes) et le guidage de la lumière dans du verre sera le ferment de révolutions technologiques.

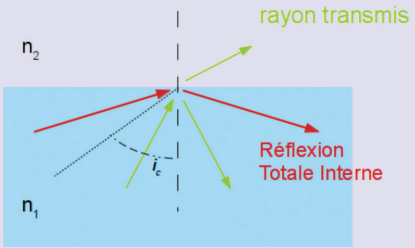
Le fibroscope, premier essor des fibres optiques

Un barreau de verre courbé ne peut pas transmettre une image mais il restitue une intensité de lumière. L'assemblage de plusieurs barreaux permet alors de recomposer une image dont la résolution dépend du diamètre du barreau. Cette idée de pixellisation de l'image, proposée dès 1895 par Henri C. Saint-René [4], est à la base du principe du fibroscope dont les fibres mesurent quelques micromètres de diamètre. Le développement de ces appareils constitue une étape importante dans l'histoire des fibres optiques car ils en sont la première application

[1]Université Nice Sophia Antipolis, CNRS, LPMC, UMR 7336, 06100 Nice, France

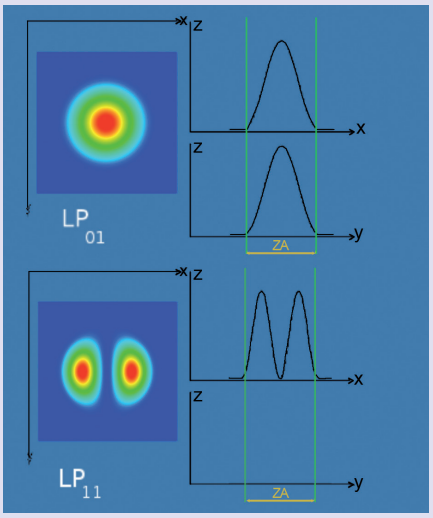
Le guidage de la lumière dans une fibre optique

Le guidage de la lumière dans un jet d'eau ou dans un barreau de verre peut s'expliquer à partir de l'optique géométrique. Soit un rayon lumineux arrivant à l'interface entre deux milieux caractérisés par leur indice de réfraction n_1 et n_2. Le rayon se propageant du milieu d'indice n_1 vers le milieu d'indice n_2 ($n_1 > n_2$), il est en partie réfracté si son angle d'incidence est inférieur à l'angle critique ou totalement réfléchi (Réflexion Totale Interne) si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle critique, cet angle étant défini comme $i_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ (Fig. a). Dans le cas d'un jet d'eau ($n_1 \approx 1{,}33$) ou d'un barreau de verre ($n_1 \approx 1{,}45$) entouré d'air ($n_2 \approx 1$), l'angle critique est respectivement de 49° et 44°.



▲ **Figure a :** Réfraction de la lumière entre deux milieux d'indice n_1 et n_2 ($n_1 > n_2$).

Dans une fibre optique telle que celle utilisée dans les télécommunications, la lumière se propage dans le cœur dont le diamètre est de 8 µm. Cette dimension étant proche de la longueur d'onde de la lumière (~1,5 µm pour les télécommunications), l'optique géométrique ne peut plus être utilisée pour expliquer la propagation de la lumière dans ce guide d'onde. On utilise alors une approche modale. L'intensité de lumière se répartit suivant un mode caractérisé par une distribution transverse d'intensité. Des exemples de modes sont reportés sur la figure b. Pour le premier mode qui peut être excité (le mode LP_{01} appelé mode fondamental), la distribution d'intensité peut s'apparenter à une gaussienne. Une partie de la lumière se situe en dehors des limites géométriques du cœur. Pour des caractéristiques opto-géométriques données (différence d'indice de réfraction, diamètre du cœur), les autres modes de propagation apparaissent en diminuant la longueur d'onde. La longueur d'onde de coupure λ_c caractérise le domaine de longueurs d'onde pour lequel la propagation est purement monomode (si $\lambda > \lambda_c$) ou multimode (si $\lambda < \lambda_c$). Pour les fibres conventionnelles utilisées par les télécommunications λ_c » 1260 nm.



▲ **Figure b :** Représentation par simulation numérique des profils d'intensité des modes LP_{01} (mode fondamental) et LP_{11} (premier mode d'ordre supérieur). L'intensité augmente du bleu au rouge. Les traits verts délimitent le cœur de rayon a. La propagation se fait suivant z, la section transverse de la fibre se situant dans le plan (*xy*) (figure extraite de http://www.unice.fr/optics/Applets/FibreCoeur.html).

marquante. De plus, leur mise au point a conduit à la structure *coeur-gaine* des fibres optiques et au développement du procédé d'étirage.

À la fin des années 20, J.L. Baird en Angleterre [5] et C.W. Hansell aux USA [6] déposent des brevets sur la transmission d'une image par un assemblage de fibres de verre. Mais la première réalisation expérimentale est attribuée à H. Lamm en 1930 [7]. La qualité de l'image transmise est perfectible car, dans cet assemblage, les fibres optiques se touchent et la lumière peut se transmettre d'une fibre à l'autre. Afin d'éviter ces ramifications de lumière, A.C.S. van Heel publie en 1954, un article dans *Nature* dans lequel il propose d'enrober la fibre avec un matériau de plus bas indice de réfraction [8]. La couche de verre externe est appelée la gaine optique (abrégée en *gaine* dans la suite de l'article), la partie centrale où se propage la lumière constituant le *cœur*. Grâce à cette structure, la lumière subit une réflexion totale à l'interface cœur-gaine sans être affectée par l'éventuel contact avec une autre fibre. Dans le même numéro de *Nature*, H.H. Hopkins et N.S. Kapany discutent de la possibilité d'utiliser un tel assemblage de fibres de verre (qu'ils proposent d'appeler *fibroscope*) pour visualiser l'intérieur du corps [9]. Il ne reste plus alors qu'à trouver le procédé pour préparer cette fibre cœur-gaine. La solution est apportée par un étudiant, L.E. Curtiss, au cours de son stage de Licence co-dirigé par B. Hirschowitz et C.W. Peters. Il développe le procédé appelé *rod-in-tube* : un barreau de verre est enchâssé dans un tube de verre dont la composition doit répondre à deux exigences : (i) avoir un indice de réfraction plus faible que celui du barreau central pour assurer le guidage de la lumière, (ii) avoir un coefficient de dilatation thermique proche de celui du barreau central. Cet assemblage forme une préforme, portée à haute température (typiquement au-dessus de la température de ramollissement) afin d'être étirée en fibre optique. L.E. Curtiss réalise les premiers tests en 1956 et dépose un brevet en 1957 (accepté en 1971) [10]. Cette même année, B. Hirschowitz teste pour la première fois sur un patient un fibroscope constitué de fibres optiques coeur-gaine.

Les télécommunications optiques

Si la lumière permet de transmettre des images comme dans le cas des fibroscopes, elle permet de transmettre plus généralement une information. Le premier réseau de télécommunication apparaît pendant la Révolution Française. Le télégraphe Chappe, du nom de son inventeur Claude Chappe, repose sur la transmission de messages à l'aide de sémaphores. Ce télégraphe optique est ensuite supplanté par le télégraphe électrique (le codage développé par Samuel Morse est breveté

en 1840 [11]). En 1880, A.G. Bell développe le photophone, premier appareil de communication basé sur une transmission d'information par modulation d'intensité de la lumière (réflexion de la lumière du soleil sur un miroir vibrant). L'utilisation de la fibre optique comme support des télécommunications commence a être envisagée au début des années 1960. L'article fondateur pour les télécommunications à base de fibre optique est publié en 1966 par C.K. Kao (Prix Nobel de Physique en 2009) et G.A. Hockham [12]. L'exploitation de ce guide d'onde faisait face à un handicap important : la transmission de la lumière était limitée à quelques mètres. Cela était acceptable pour les fibroscopes mais rédhibitoire pour une application telle que les communications longue-distance. Dans cet article de 1966, la cause des pertes optiques est identifiée et attribuée à la présence d'impuretés dans le verre de silice, en particulier à la présence de fer (cet élément donne une couleur verte caractéristique dans les vitres par exemple). La transmission pouvait donc être améliorée en purifiant la silice. Les auteurs indiquèrent qu'en atteignant le seuil de 20 dB/km pour les pertes optiques (elles sont typiquement de l'ordre de 1000 dB/km dans les années 60), la fibre optique à base de verre pourra être utilisée comme support pour les télécommunications. Dès 1970, des pertes de 17 dB/km sont annoncées par une équipe de Corning [13]. Ces premiers résultats initient une intense activité sur l'élaboration de nouveaux procédés (décrits dans la suite de l'article) et en 1979 les pertes ne sont plus que de 0,2 dB/km [14]. En dix ans, la longueur de fibre capable de restituer 1 % de l'intensité initiale s'est allongée de 10 m à 100 km. À l'heure actuelle, les pertes les plus faibles reportées sont de 0,1484 dB/km [15]. Grâce à cet essor, les premières liaisons par fibre optique sont initiées dès la seconde moitié des années 70, à l'échelle d'une ville. Le premier câble transatlantique est posé en 1988 (TAT-8). Ce câble véhicule l'information par fibre optique mais les amplificateurs sont électroniques. Les premières démonstrations d'amplificateurs à fibre optique pour les télécommunications datent de 1987 [16,17]. Ils reposent sur une fibre à base de silice dont le cœur est dopé avec des ions erbium (Er^{3+}) amplifiant les longueurs d'onde vers 1,55 µm, domaine de plus faible atténuation de la silice. La mise en pratique de cet amplificateur est très rapide puisqu'il est installé dès 1995 dans le câble transatlantique TAT-12. Ces étapes marquent une augmentation significative de la capacité de transmission : 288 Mbit/s pour TAT-8, 60 Gbit/s pour TAT-12. La capacité de transmission d'une fibre optique atteint aujourd'hui 50 Tbit/s [18]. Le principal effort de déploiement de la fibre optique réside maintenant dans les programmes type Fibre To The Home (FTTH), consistant à s'affranchir des derniers mètres de cuivre reliant la maison au central, en les remplaçant par des fibres optiques. Bien que la réalisation à l'échelle nationale de ce type de projet soit récente, un projet précurseur avait été initié dès 1978, à Biarritz, pour relier 1500 maisons [19].

De la silice ultra-pure

L'extraordinaire transparence acquise par les fibres à base de silice au cours des années 70 est liée au développement de trois procédés de fabrication spécifiques. Ils ont en commun la synthèse chimique du verre proposée par F. Hyde en 1934 chez Corning [20]. À cette époque, la silice est obtenue en faisant fondre le quartz ce qui nécessite une haute température (de l'ordre de 1700 °C) et, compte tenu de la viscosité du matériau, la mise en forme du verre n'est pas aisée. F. Hyde découvre la synthèse de la silice par voie gazeuse : $SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2\,Cl_2$, les vapeurs de tétrachlorure de silicium ($SiCl_4$) passant à travers la flamme d'un chalumeau s'oxydent pour former des suies de silice (particules de diamètre < 1 µm) qui peuvent être densifiées pour former du verre. Cette réaction s'opère à température plus basse (à partir de 1200 °C) que celle utilisée pour faire fondre le quartz, et la formation de suies ouvre des perspectives intéressantes pour la mise en forme finale du verre. Mais ce verre présente aussi des propriétés optiques remarquables car il contient très peu d'impuretés de par le procédé même de synthèse. Les vapeurs de chlorures sont obtenues en faisant buller l'oxygène dans le chlorure liquide. Le taux d'extraction dépend ainsi de la pression de vapeur saturante. Or, celle de $SiCl_4$ est parmi les plus élevées de tous les chlorures : de l'ordre de 0,5 atm à 30 °C, alors que pour le fer (l'une des principales impuretés à éliminer) elle est de ~10^{-12} atm. La phase gazeuse est donc naturellement purifiée. Peu de temps après, M. Nordberg découvre qu'en ajoutant du titane, le coefficient de dilatation thermique de la silice devient pratiquement nul [21]. Mais c'est l'élévation d'indice induite par l'ajout de titane qui va retenir l'attention pour les premières réalisations par le procédé *rod-in-tube*, la gaine étant en silice pure et le cœur en silice dopée titane. Toutefois, l'état de surface et les contaminations résiduelles de l'interface cœur-gaine conduisent à des pertes trop élevées [22]. L'équipe de Corning, dirigée par Robert Maurer, propose de déposer les suies de silice dopée Ti à l'intérieur d'un tube de silice pour s'affranchir des problèmes d'interface cœur-gaine. Les suies sont formées à l'entrée du tube dans la flamme du chalumeau. Elles tapissent l'intérieur du tube grâce à la dépression formée à l'intérieur de celui-ci. Les suies sont ensuite densifiées et le tube est rétreint, c'est-à-dire porté à très haute température (aux environs des 2000 °C) pour se refermer sur lui-même et former un barreau contenant en son centre la couche de silice dopée Ti. Ce procédé permit d'obtenir la première fibre à 17 dB km [11]. Cependant, il présentait deux inconvénients majeurs.

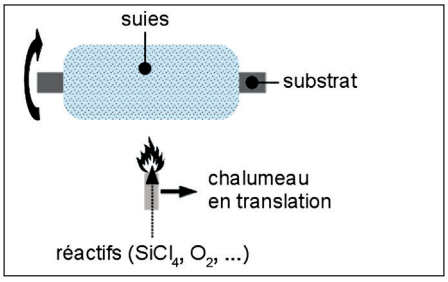
Premièrement, l'élévation de l'indice de réfraction du verre de cœur était assurée en introduisant du titane. Les hautes températures mises en jeu dans ce procédé de fabrication (l'étirage en fibre optique nécessite des températures de l'ordre de 2000 °C) conduisent à la réduction du titane (Ti^{3+}), centre absorbant qui doit être éliminé en chauffant la fibre à 800–1000 °C. Or ce traitement thermique fragilise les propriétés mécaniques de la fibre. Deuxièmement, ce procédé ne permet pas d'obtenir de grandes longueurs de fibre. Les trois procédés de fabrication de préformes à base de silice développés au cours des années 70 viseront à s'affranchir de ces deux limitations. Ils sont encore les plus utilisés à l'heure actuelle. Ces procédés ont remplacé le titane et introduit d'autres dopants, mais leur nombre reste très limité :

– le germanium (Ge) est l'élément le plus utilisé pour élever l'indice de réfraction (en remplacement du titane) et augmente la photosensibilité (application à la photo-inscription des réseaux de Bragg décrits dans la suite de l'article),
– le phosphore (P) baisse la viscosité de la silice ce qui permet de travailler à plus basse température et de rendre le verre plus homogène ; des couches de silice dopée avec du phosphore peuvent être intercalées entre le cœur et la silice de la gaine optique pour adapter les différences de viscosité,
– le fluor (F) diminue l'indice de réfraction (un anneau de plus bas indice autour du cœur permet de diminuer les pertes aux courbures) et baisse aussi la viscosité de la silice,
– le bore (B) diminue l'indice de réfraction de la silice (mais moins efficacement que le fluor) et induit des contraintes dans la silice à cause des coefficients de dilatation thermique (utilisé dans les fibres à maintien de polarisation par exemple). Le co-dopage Ge-B permet d'augmenter la photosensibilité,
– les ions de terres rares, en particulier l'erbium (Er), l'ytterbium (Yb) ou le thulium (Tm) sont introduits pour les propriétés de luminescence (applications dans les amplificateurs ou les lasers à fibre),
– l'aluminium (Al) augmente l'indice de réfraction mais il est principalement employé pour éviter la formation d'agrégats de terres rares (conduisant à une diminution de leur efficacité d'émission).

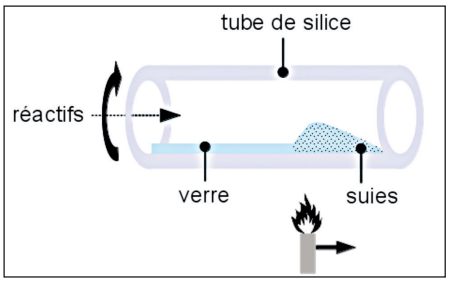
Les procédés de fabrication de préformes

OVD (*Outside Vapor Deposition*)

L'OVD a été développé par l'équipe de Corning au début des années 70 [23]. Ce procédé consiste à déposer sur un substrat cylindrique en rotation les suies formées par la réaction des chlorures et de l'oxygène dans le chalumeau, en translation le long du substrat (Fig. 1). La composition des suies est adaptée pour former d'abord le verre de cœur puis le verre de gaine. Le substrat est ensuite retiré et les suies sont densifiées afin de former un tube de verre qui est rétreint en une préforme. La mise en place de ce nouveau procédé correspond au remplacement du titane par le germanium. Sans post-traitement thermique de la fibre, des pertes de 4 dB/km ont été très rapidement obtenues [24]. Ce procédé représente aujourd'hui 25 % de la production des fibres monomodes à base de silice.



▲ **Figure 1 :** Principe du dépôt OVD.



▲ **Figure 2 :** Principe du dépôt MCV.

MCVD (*Modified Chemical Vapor Deposition*)

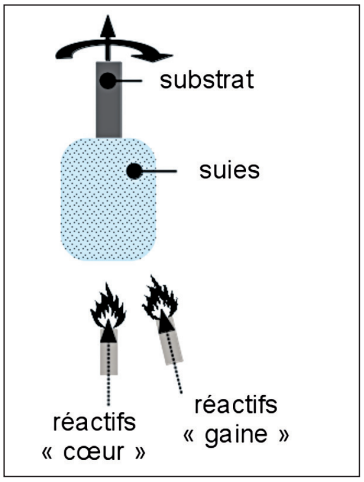
Peu après l'invention du procédé OVD, le procédé MCVD a été mis au point par J.B. Mc Chesney et ses collègues au Bell Labs [25]. Dans ce procédé, les suies sont formées à l'intérieur du tube de silice en rotation et la translation du chalumeau le long du tube assure la densification des suies (Fig. 2). Ainsi, contrairement à la CVD (Chemical Vapor Deposition), procédé très développé pour les semi-conducteurs dans lequel les précurseurs réagissent sur le substrat, dans la MCVD, les réactions ont lieu en phase gazeuse. Les éléments tels que Si, Ge, P, F ou B peuvent être apportés en phase gazeuse. Tous les autres éléments (par exemple l'aluminium ou les ions de terres rares) sont apportés par le dopage en solution [26]. Pour cela, la couche de cœur est laissée poreuse puis imprégnée d'une solution (à base d'éthanol ou d'eau en général) contenant les ions dopants. Une fois la solution retirée, la couche de cœur est densifiée. Le procédé MCVD est le plus utilisé pour les fibres dites de spécialité (par opposition aux fibres de ligne). Les fibres optiques monomodes préparées par ce procédé représentent 40 % de la production mondiale. Une évolution du procédé MCVD repose sur la formation d'un plasma dans le tube de silice pour assurer la formation des suies et leur densification (procédé PECVD, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) [27]. Les fibres à base de silice (monomodes) préparées par ce procédé représentent 15 % de la production mondiale.

VAD (*Vapor Axial Deposition*)

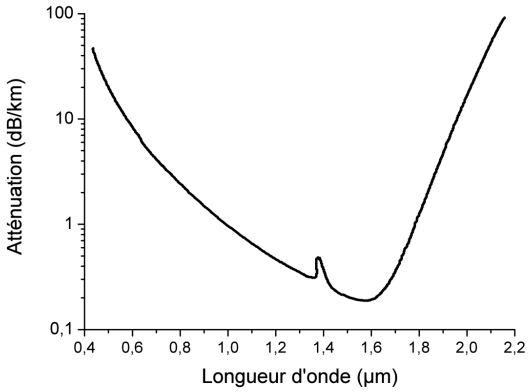
Le dernier procédé à apparaître dans les années 70 vient de l'entreprise japonaise NTT : le procédé VAD [28]. Dans ce procédé, le tube substrat est maintenu verticalement et les suies sont déposées sur l'extrémité basse du substrat (Fig. 3). Les chalumeaux sont ensuite déplacés vers le bas (ou le barreau entraîné vers le haut) au fur et à mesure du dépôt des suies. Contrairement aux procédés MCVD et OVD, la préforme est créée par translation verticale et le cœur et la gaine sont synthétisés simultanément par un chalumeau dédié. La consolidation des suies (pour obtenir une préforme) se fait à l'aide d'un four qui peut être placé au-dessus des chalumeaux. Les fibres à base de silice (monomodes) préparées par ce procédé représentent 20 % de la production mondiale.

Les préformes issues de ces procédés sont ensuite introduites verticalement dans un four porté à 2000 °C et étirées en fibre optique. La capacité d'un verre à rester stable (ne pas dévitrifier) au cours de cette étape nécessite d'avoir la plus grande différence possible entre la température de début de cristallisation du matériau et la température de transition vitreuse. Cet écart est typiquement supérieur à 100 °C. À la sortie du four, les fibres sont enrobées d'un revêtement de protection (à base de polymères) afin de conserver les propriétés mécaniques (empêcher l'abrasion de la surface, le contact avec l'humidité). Les préformes actuelles ont un diamètre de 1 à 20 cm et une longueur d'un mètre ou plus. Une seule préforme peut ainsi donner plusieurs milliers de kilomètres de fibre optique de 125 µm de diamètre.

Grâce à ces procédés, les impuretés tel que le fer ont été éliminées rapidement (la concentration est maintenant inférieure à 0,1 ppb). Les radicaux OH, qui induisent une bande d'absorption vers 1,39 µm (1 ppm massique d'OH induit une absorption de 40 dB/km à 1,39 µm), très proche du minimum d'atténuation de la silice, ont été les dernières impuretés à éliminer. De telles fibres ont été commercialisées à partir du milieu des années 2000. Le spectre d'atténuation de la silice (Fig. 4) est maintenant lié aux absorptions intrinsèques : absorption bande-à-bande aux courtes longueurs d'onde, variations de densité et de composition conduisant à la diffusion Rayleigh, bandes d'absorption vibrationnelles limitant la transmission au-delà de 2 µm. Les niveaux d'atténuation s'approchent de ceux prévus théoriquement [29].



▲ **Figure 3 :** Principe du dépôt VAD.



▲ **Figure 4 :** spectre d'atténuation typique de la silice. La bande d'absorption à 1,39 µm, liée aux radicaux OH, est supprimée dans les fibres actuelles.

D'autres applications

L'intérêt suscité par les fibres optiques s'étend bien au-delà du simple transport de la lumière comme dans les fibroscopes ou les fibres de ligne des télécommunications. Sans dresser une liste exhaustive des applications qui ont bénéficié de ce guide d'onde (la lecture de la référence 30 permettra d'appréhender cette diversité), deux exemples ont été choisis pour illustrer cet article.

Une des avancées les plus spectaculaires de ces dernières années réside dans le développement des lasers à fibre optique de puissance. Par rapport aux lasers conventionnels, les fibres optiques présentent de nombreux avantages : facilité de gestion de la dissipation thermique, très haut rendement de conversion électrique-optique, cavité laser entièrement fibrée donc ne nécessitant pas d'alignement, *etc.* [31]. De tels lasers, dont on peut extraire plus de 100 kW de puissance optique, sont utilisés principalement dans l'industrie pour le marquage ou l'usinage de pièces. Un autre secteur en pleine expansion est celui des capteurs à base de fibre optique. Pour n'en citer qu'un, celui des fibres à base de réseaux de Bragg. Ces derniers correspondent à une modulation longitudinale et périodique de l'indice de réfraction du cœur. Les variations d'indice optique vont de quelques 10^{-5} à quelques 10^{-3} suivant les applications visées. Ces réseaux sont généralement obtenus par insolation laser UV du cœur de la fibre dopé d'éléments photosensibles tels que le germanium. Pour augmenter la photosensibilité, les fibres peuvent être chargées en hydrogène sous haute pression. Ces composants ont la particularité de réfléchir une certaine longueur d'onde en fonction, notamment, du pas du réseau. Les déformations subies par l'ouvrage d'art (pont, immeuble, gazoduc, *etc.*) au sein duquel est installée la fibre optique, se répercutant sur les caractéristiques du réseau, modifient la longueur d'onde de la lumière réfléchie. Une telle fibre est utilisée comme capteur de température

puisque cette dernière modifie les caractéristiques du réseau de Bragg (le déplacement de la longueur d'onde réfléchie est typiquement de l'ordre du pm/°C). Par ailleurs, de telles fibres sont d'excellents miroirs pour former une cavité laser directement intégrée dans une fibre optique.

D'autres structures de guidage

La structure opto-géométrique d'une fibre optique de ligne *télécoms* (assurant le transport passif de la lumière) repose sur un cœur dont le diamètre mesure 8 µm (celui de la gaine optique est de 125 µm) et dont l'élévation d'indice est de l'ordre de 4×10^{-3}. Cette structure est la plus commune mais d'autres existent. Par exemple, afin d'augmenter la bande passante pour les télécommunications, une fibre optique contenant 10 cœurs est actuellement envisagée, chacun des cœurs guidant 10 modes optiques [32]. Ceci constitue un changement de paradigme puisque jusqu'à maintenant, seul le guidage monomode était envisagé pour les télécommunications longue-distance. Une autre grande famille de structures de guidage est représentée par les fibres micro-structurées air-silice, développées dans les années 90 [33,34]. Elles sont constituées d'un arrangement périodique de trous d'air dans la silice, répartis autour du cœur central. Les trous d'air permettent de diminuer l'indice moyen de la couronne air-silice et d'assurer le guidage dans le cœur de silice par différence d'indice de réfraction. En contrôlant parfaitement la périodicité des trous d'air, un autre mécanisme de guidage intervient, basé sur l'existence de bandes photoniques interdites. La lumière se propage alors dans le cœur car elle ne peut le faire dans le cristal photonique environnant. La particularité de ce guidage est qu'il ne dépend plus de la différence d'indice cœur-gaine comme dans une fibre conventionnelle. Il peut ainsi être mis en œuvre pour un cœur constitué d'air [35]. Gestion de la dispersion modale, exaltation des effets non-linéaires, propagation monomode sur une très grande plage de longueurs d'onde (typiquement 400–2200 nm) sont d'autres possibilités offertes par de telles structures et inaccessibles aux fibres conventionnelles.

D'autres matériaux

Bien que la silice soit le verre le plus communément utilisé pour préparer des fibres optiques en verre, ce matériau comporte des limitations : fenêtre de transparence limitée aux longueurs d'onde inférieures à 2 µm, énergie de phonons élevée et faible solubilité des ions luminescents pénalisant les propriétés de luminescence, faibles non-linéarités optiques, *etc.* D'autres compositions verrières sont donc étudiées (les fibres optiques à base de plastique sont aussi d'intérêt mais ne sont pas le propos de cet article).
Afin de conserver les avantages mécaniques de la silice, des fibres développées sur le modèle des vitro-céramiques sont proposées [36]. De telles fibres permettent par exemple d'exacerber les propriétés non-linéaires de la silice en introduisant des nanoparticules de métaux nobles (Ag, Au). Il est aussi proposé de modifier les propriétés de luminescence des ions de terres rares ou des métaux de transition en les insérant dans des nanoparticules d'oxydes ou oxy-fluorées. Tout en conservant une gaine de silice, des compositions radicalement différentes sont développées tels que des cœurs semi-conducteurs (Si, Ge ou InSb) afin d'augmenter les non-linéarités ou accroître la fenêtre de transmission dans l'infra-rouge [37].
Les verres fluorés et chalcogénures sont une alternative très intéressante car ils présentent une fenêtre de transmission beaucoup plus importante dans l'infra-rouge, jusqu'à 20–25 µm pour les chalcogénures. De plus, comparativement, à la silice, ils ont aussi l'avantage d'avoir des propriétés non-linéaires beaucoup plus importantes (indice non-linéaire un ou deux ordres de grandeur plus important que dans la silice), et une énergie de phonons beaucoup plus faible (200–500 cm^{-1}, contre 1200 cm^{-1} pour la silice). Les pertes optiques dans ces fibres sont supérieures à celles reportées dans la silice, mais sont compatibles avec les applications telles que les amplificateurs ou les capteurs qui ne nécessitent que quelques mètres de fibre. Ces verres présentent aussi la particularité d'avoir une température de transition vitreuse (T_g) plus faible que la silice. Ceci permet d'envisager d'autres procédés de fabrication de fibres optiques, tels que l'extrusion [38] ou le moulage [39].

Wilfried Blanc est chercheur au CNRS. Pendant sa thèse (1996-2000 à l'Institut Lumière Matière - Université Lyon 1), il s'est intéressé aux propriétés de luminescence dans des matériaux scintillateurs. Au cours de son séjour post-doctoral à l'Université de Bordeaux 1 (Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux), en partenariat avec Rhodia, il a développé des luminophores adaptés aux excitations optiques dans le bleu-UV. Depuis son arrivée à l'Université de Nice, en 2002, son activité de recherche porte sur la conception, fabrication et caractérisation de fibres optiques.

Conclusion

Si le guidage de la lumière dans un barreau de verre était déjà rapporté en 1842, il aura fallu attendre plus d'un siècle pour que la fibre optique de verre devienne un composant clé de nombreuses applications. L'essor de ces fibres est intimement lié aux procédés spécifiques de fabrication développés dans les années 70. L'ultra-pureté de la silice synthétisée a permis d'exploiter pleinement les propriétés optiques de ce verre. Aujourd'hui, le marché des

fibres optiques est en expansion, aussi bien dans les télécommunications que les capteurs ou les lasers et amplificateurs. Mais l'accroissement du marché, principalement porté par les fibres optiques à base de silice, ne doit pas masquer les limites de ce verre. Loin de se satisfaire de cet apport déjà considérable, les recherches continuent d'être très actives, tant au niveau des matériaux, que des structures de guidage ou des applications. A cet égard, les deux réseaux regroupant les principaux acteurs académiques français (le GIS Grifon (Groupement d'Initiatives pour les Fibres Optiques Nouvelles, http://grifon.xlim.fr), soutenu par le CNRS, et Photonics Bretagne (http://photonics-bretagne.com) montrent la vitalité de la recherche en France dans ce domaine.

Références

[1] J. Hecht, « City of light : the stories of fiber optics», Oxford University Press (2004)

[2] J.D. Colladon, « Sur les réflexions d'un rayon de lumière à l'intérieur d'une veine liquide parabolique », *Compte-rendus de l'Académie des Sciences* **15**, 800 (1842)

[3] J. Babinet, « Note sur la transmission de la lumière par des canaux sinueux », *Compte-rendus de l'Académie des Sciences* **15**, 803 (1842)

[4] H.C. Saint-René, « Sur une solution du problème de la vision à distance », Pli cacheté (1895)

[5] J.L. Baird, « An improved method and means of producing Optical images », British patent 285,738 (1928)

[6] C.W. Hansell, « Picture transmission », US patent 1,751,584 (1930)

[7] H. Lamm, « Biegsame Optische Geräte », *Z. Instrumentenk* **50**, 579 (1930)

[8] A.C.S. Van Heel, « A new method of transporting optical images without aberrations », *Nature* **173**, 39 (1954)

[9] H.H. Hopkins, N.S. Kapany, « A flexible fiberscope, using static scanning », *Nature* **173**, 39 (1954)

[10] L.E. Curtiss, « Glass fiber optical devices », US Patent 3.589.793 (1971)

[11] S.F.B. Morse, « Improvement in the mode of communicating information by signals by the application of electromagnetism », US Patent 1,647 (1840)

[12] C.K. Kao, G.A. Hockhan, « Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies », *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* **113**, 1151 (1966)

[13] F.P. Kapron, D.B. Keck, R.D. Maurer, « Radiation losses in glass optical waveguides », *Appl. Phys. Lett.* **17**, 423 (1970)

[14] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, T. Miyashita, « Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 µm », *Electron. Lett.* **15**, 106 (1979)

[15] K. Tsujikawa, K. Tajima, J. Zhou, « Intrinsic loss of optical fibers », *Optical Fiber Technology* **11**, 319 (2005)

[16] R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D.N. Payne, « Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 µm », *Electron. Lett.* **23**, 1026 (1987)

[17] E. Desurvire, J.R. Simpson, P.C. Becker, « High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier. » *Opt. Lett.* **12**, 888 (1987)

[18] T.J. Xia *et al.* « High Capacity Field Trials of 40.5 Tb/s for LH Distance of 1,822 km and 54.2 Tb/s for Regional Distance of 634 km », *Proc. Optical Fiber Conference / National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC),* PDP5A.4 (2013)

[19] J. Hecht, « The first fibers to homes », *Optics and Photonics News* **22**, 36 (2011)

[20] F. Hyde, « Method of making transparent article of silica », US patent 2,272,342 (1942)

[21] M. Nordberg, « Glass having an expansion lower than that of silica », US patent 2,326,059 (1943)

[22] P.C. Schultz, « Making the first low-loss optical fibers », *OPN Optics & Photonics News* **21**, 30 (2010)

[23] D.B. Keck, P.C. Schultz, F. Zimar, « Method of forming optical waveguide fibers », US Patent 3,737,292 (1973)

[24] D.B. Keck, R.D. Maurer, P.C. Schultz, « On the ultimate lowerlimit of attenuation in glass optical waveguides », *Appl. Phys. Lett.* **22**, 307 (1972)

[25] J.B. MacChesney, P.B. O'Connor, H.M. Presby, « A new technique for the preparation of low-loss and graded-index optical fibers », *Proceedings of the IEEE* **62**, 1280 (1974)

[26] J.E. Townsend, S.B. Poole, D.N. Payne, « Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres », *Electron. Lett.* **23**, 329 (1987)

[27] P. Geittner, D. Küppers, H. Lydtin, « Low-loss optical fibers prepared by plasma-activated chemical vapor deposition (CVD) », *Appl. Phys. Lett.* **28**, 645 (1976)

[28] T. Izawa, S. Kobayashi, S. Sudo, F. Hanawa, « Continuous fabrication of high silica fibre preform », in *International conference on integrated optics and optical-fibre communication* C1-1(1977)

[29] D.A. Pinnow, T.C. Rich, F.W. Jr Ostermayer, M. Jr Di Domenico, « Fundamental optical attenuation limits in the liquid and glassy state with application to fiber optical waveguide materials », *Appl. Phys. Lett.* **22**, 527 (1973)

[30] A. Méndez, T.F. Morse, « Specialty Optical Fibers Handbook », Ed. Elsevier (2007)

[31] D.J. Richardson, J. Nilsson, W.A. Clarkson, « High power fiber lasers: current status and future perspectives », *J. Opt. Soc. Am. B* **27**, 63 (2010)

[32] D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson, « Space-division multiplexing in optical fibres », *Nature Phot.* **7**, 354 (2013)

[33] J.C. Knight, T.A. Birks, P. St J. Russell, D. M. Atkin, « All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding », *Optics letters* **21**, 1547 (1996)

[34] J. Lægsgaard, A. Bjarklev, « Microstructured optical fibers—fundamentals and applications. », *J. Am. Ceram. Soc.* **89**, 2 (2006)

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

[36] W. Blanc, B. Dussardier, E. Burov, A. Pastouret, « Formation et applications des nanoparticules dans les fibres optiques à base de silice », chapitre du livre « Du verre au cristal. Nucléation, croissance et démixtion, de la recherche aux applications », Ed. Daniel R. Neuville, Laurent Cormier, Daniel Caurant, Lionel Montagne, EDP Sciences (2013)

[37] J. Ballato, T. Hawkins, P. Foy, B. Yazgan-Kokuoz, C. McMillen, L. Burka, S. Morris, R. Stolen, R. Ric, « Advancements in semiconductor core optical fiber », *Optical Fiber Technology* **16**, 399 (2010)

[38] K. M. Kiang, K. Frampton, T. M. Monro, R. Moore, J. Tucknott, D. W. Hewak, D. J. Richardson, H. N. Rutt, « Extruded single-mode non-silica glass holey optical fibres », *Electron. Lett.* **38**, 546 (2002)

[39] Q. Coulombier, L. Brilland, P. Houizot, T. Chartier, T. N. N'Guyen, F. Smektala, G. Renversez et al, « Casting method for producing low-loss chalcogenide microstructured optical fibers » *Opt. Express* **18**, 9107 (2010)