

La fibre optique : Internet dans un grain de sable

Sébastien Février travaille dans l'équipe Photonique au sein de l'Institut XLIM de l'Université de Limoges. Physicien de formation, ses recherches portent sur les lasers et fibres optiques innovantes.

Derrière ce titre relativement poétique, se cache une description plus scientifique. En fait, ce chapitre aurait pu s'intituler « la fibre optique : un fil de silice ultra-pure dont les propriétés physiques sont adaptées aux besoins des télécommunications optiques modernes avec l'aide de la chimie ».

1 Les télécommunications avant l'avènement de la fibre optique

1.1. Les télécommunications avant 1976

La **Figure 1** représente un peu ce à quoi ressemblaient les télécommunications avant 1976, c'est-à-dire avant l'avènement du premier câble à fibre optique : des télécommunications à faible distance, à faible débit, même si le débit était

sûrement un peu plus élevé que ce qu'autorise l'émission de nuages de fumée.

1.2. Du câble coaxial à la fibre monomode

Pour mieux comprendre l'évolution des télécommunications, rappelons le mode de propagation des ondes électromagnétiques. Dans un milieu homogène (l'air, le vide par exemple), les ondes se propagent en ligne droite et subissent le phénomène de diffraction. La densité de puissance en un point d'observation situé dans le faisceau diminue donc rapidement avec l'éloignement. Sur la **Figure 2** le faisceau d'un phare de voiture s'élargit dans le brouillard. Pour déporter des ondes électromagnétiques sur de longues distances, on peut utiliser un guide d'ondes : la propagation guidée remplace

Figure 1

Huile sur toile de Frederic Remington (1905) intitulée « The smoke signal ».



Figure 2

Faisceau d'un phare de voiture. Les ondes se propagent en ligne droite, subissent la diffraction et sont atténuées dans l'atmosphère. La densité de puissance en un point d'observation situé dans le faisceau diminue donc rapidement avec l'éloignement.



la propagation en espace libre.

Le câble coaxial (Figure 3) est un exemple de guides d'ondes. Le câble coaxial est un assemblage de diverses parties de cuivre, utilisé jusqu'à la fin

des années 1970. La bande passante en fréquence¹ extrêmement réduite limite le débit. Par exemple, en 1946, au sortir de la seconde Guerre Mondiale, on pouvait passer à peu près 600 appels simultanément à l'aide de l'un de ces câbles ou une seule émission télévisée. Les performances ont été graduellement améliorées, mais la capacité de ces réseaux de télécommunications a été limitée à 90 000 appels simultanés, à la fin des années 1970. Ce type de câble coaxial présente en outre une



Figure 3

Un câble coaxial.

1. La bande passante est l'intervalle de fréquence pour lesquelles l'amplitude de la réponse d'un système correspond à un niveau de référence, domaine où le système peut être considéré comme fiable.

forte atténuation en puissance. Il est donc nécessaire d'introduire de nombreux répéteurs afin de régénérer les signaux transmis, ce qui augmente considérablement le coût du réseau.

Aujourd'hui, les télécommunications s'appuient sur la fibre optique monomode (**Figure 4**). Grâce à ce composant révolutionnaire, le volume global de données transmis en 2013 représente l'équivalent d'environ 250 milliards de DVD. L'augmentation de ce trafic est exponentielle. À titre d'exemple, le volume transmis en 2013 a été équivalent à celui transmis depuis les origines d'Internet.

Ce volume de données passe à travers plusieurs dizaines



Figure 4

Une fibre optique monomode.

de millions de kilomètres de fibres optiques, installées essentiellement en sous-marin. La **Figure 5** dresse une cartographie des principaux câbles. Beaucoup de ces câbles sont transocéaniques dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique. De nouveaux câbles sont à l'étude notamment dans le passage du Nord-Ouest, au nord du Canada.

Figure 5

Répartition des câbles à fibre optique sur la planète. 99 % du trafic passent par plusieurs dizaines millions de kilomètres de fibres optiques !



2 La fibre optique

2.1. Invention et développement

Le passage du câble coaxial à la fibre optique résulte de la conjugaison des efforts dans plusieurs disciplines scientifiques : les mathématiques appliquées, la physique et la chimie comme cela est illustré sur la **Figure 6**, plus quelques autres facteurs économiques plus ou moins indépendants de la volonté des chercheurs.

La propagation des ondes électromagnétiques est régie par quatre équations, connues comme les lois de l'électromagnétisme. L'unification de ces lois par James Clerk Maxwell est un des succès de la science moderne. Tous les phénomènes électromagnétiques linéaires, en particulier la propagation dans une fibre optique, sont très bien décrits par les équations de Maxwell. La perfection de cette théorie et son pouvoir prédictif ont inspiré les créateurs qui l'ont alors comparée à l'action divine ! En tout cas, c'est ce que semble vouloir dire un tee-shirt célèbre parmi les étudiants fréquentant le campus du Massachusetts Institute of Technology à Boston (**Figure 6**). Cette théorie a permis de mettre au point l'architecture interne des fibres optiques, de les dimensionner

pour assurer une propagation guidée de la lumière, et d'augmenter la bande passante de ces composants.

Le développement des fibres optiques n'aurait pu se faire sans les extraordinaires progrès de la chimie et de la synthèse chimique de matériaux ultra-purs. Pour se rendre compte des propriétés extraordinaires de ces matériaux il faut imaginer aujourd'hui, quand on prend une fibre optique, que si elle était suffisamment grosse pour regarder au travers, on pourrait voir à cent kilomètres ; alors qu'à travers une vitre ordinaire au-delà de 20 à 30 cm d'épaisseur, on ne voit déjà plus rien. Cette différence résulte des niveaux de pureté extraordinaires des matériaux utilisés dans ces fibres optiques.

Dans les années 1960, personne ne croyait que la technologie des câbles coaxiaux pourrait devenir rapidement obsolète. La persévérance des chercheurs, leur confiance en la technologie révolutionnaire des fibres optiques, a été un facteur déterminant pour leur déploiement. C'est en particulier grâce à Sir Charles Kao (lauréat du prix Nobel de physique en 2009) et grâce à l'effort d'évangélisation qu'il a mené pendant toute sa carrière que l'on peut aujourd'hui utiliser cette technologie.

Figure 6

Des mathématiques appliquées (ici les équations de Maxwell) à la chimie, auxquelles s'ajoute le marché et un peu de persévérance : les ingrédients de la réussite pour les fibres optiques !



Maths -
Physique

Chimie

Marché

Foi

Parallèlement, la demande des clients a conforté les donneurs d'ordre de la viabilité économique de cette technologie. D'immenses efforts industriels ont été consentis pour mener les méthodes de fabrication à maturité, et donc atteindre les niveaux de pureté actuels. La possibilité d'un déploiement industriel de ces technologies les a ainsi propulsées au niveau où nous les connaissons.

2.2. Qu'est ce qu'une fibre optique ?

Pour mieux comprendre ce qu'est une fibre optique, refaisons la première expérience de fontaine lumineuse réalisée par Jean-Daniel Colladon au milieu du XIX^e siècle (Figure 7). De l'eau s'écoule d'une cuve percée d'un trou. La lumière d'une source lumineuse passe au travers de la cuve jusqu'à l'orifice. Si la lumière réussit à passer par le trou, elle suit

l'écoulement et s'y propage. Colladon, dans un article scientifique, écrit : « le résultat est étonnant : la lumière circule dans ce jet transparent, comme dans un canal, et en suit toutes les inflexions ». Il bat alors en brèche la croyance selon laquelle la lumière se propage toujours en ligne droite.

La Figure 8A représente un zoom sur cette expérience. On observe des zigzags de la lumière verte à l'intérieur de l'écoulement. La trajectoire du rayon lumineux s'explique par une succession de réflexions à l'interface entre l'eau et l'air. Puisque la lumière ne sort pas, même partiellement de l'écoulement, on parle de « réflexion interne totale ». Formellement, une réflexion interne totale s'explique par une relation entre l'angle du rayon lumineux et les indices de réfraction des deux milieux (eau et air) : la relation de Snell-Descartes (Figure 8B).

Évidemment, on ne peut pas faire une fibre optique avec

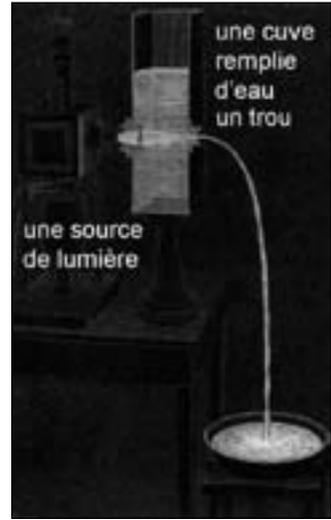


Figure 7

La fontaine lumineuse de Jean-Daniel Colladon (1884) tirée de D. Colladon, « La fontaine Colladon », *La Nature*, pp. 325-326 (1884). La lumière se propage dans l'écoulement courbe.

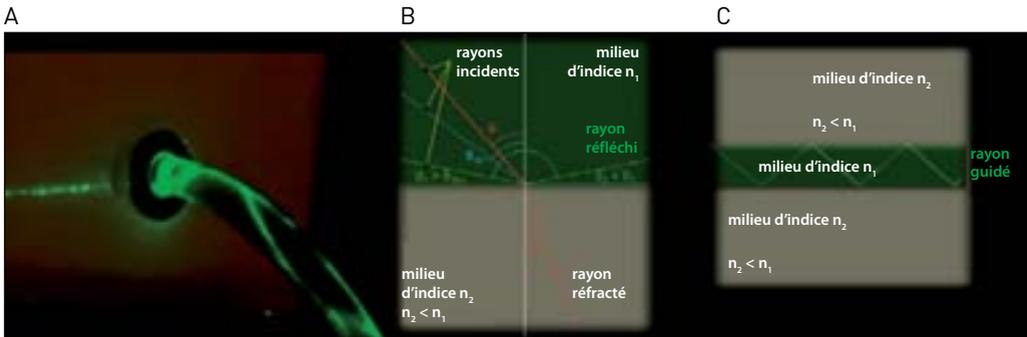


Figure 8

A) Illustration du phénomène de la fontaine lumineuse. La lumière subit une succession de réflexions à l'intérieur de l'écoulement.

B) Relation de Snell-Descartes : $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$. On définit l'angle incident limite θ_{1lim} pour $\theta_2 = \pi/2$. Pour $\theta_1 > \theta_{1lim}$, il y a réflexion interne totale ($\theta_2 = \theta_1$);

C) Le milieu d'indice n_1 est pris en sandwich entre deux milieux d'indice n_2 . Le rayon réfléchi est alors piégé. On parle de guidage ou confinement de la lumière.

uniquement de l'eau entourée d'air. En revanche, on peut utiliser deux verres d'indices de réfraction différents. Le phénomène de réflexion interne totale sera obtenu lorsque le verre d'indice supérieur sera « emprisonné » dans le second verre (**Figure 8C**). Une fibre optique est donc un assemblage concentrique de ces deux verres. La zone centrale est appelée « cœur », tandis que la zone périphérique est appelée « gaine ». Le diamètre du cœur est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, c'est-à-dire de quelques micromètres. Le diamètre total de la fibre optique mesure une centaine de micromètres, soit à peine plus qu'un cheveu. Un matériau de protection entoure la gaine et la protège de l'usure, du vieillissement, des chocs, des pressions. Grâce à cette protection, il est possible de courber, tordre, enrouler, étirer la fibre optique sans qu'elle ne casse. Cet assemblage est extrêmement solide et ne craint que les courbures inférieures à environ 1 millimètre de rayon. Une fibre optique peut mesurer des dizaines voire des

centaines de kilomètres de long. Le fait que cette technologie ait émergé comme un moyen de télécommunication est évidemment lié à l'avènement du laser, qui produit une lumière cohérente pouvant être injectée et véhiculée de manière très efficace dans la fibre optique. (**Figure 9**).

La **Figure 10** montre le schéma d'une coupe de fibre optique. Les deux verres utilisés ont des indices de réfraction différents. Comme il faut que ces deux verres possèdent les mêmes coefficients d'expansion thermique, on utilise donc à la base les mêmes matériaux mais ils sont dopés différemment lors de la phase de synthèse chimique. Ces matériaux sont entourés d'un polymère hydrophobe qui empêche l'eau de pénétrer au cœur de la fibre et donc de la détériorer.

Le débit d'une liaison de télécommunications optiques est lié à la bande passante de la fibre optique. Ce paramètre est maximisé dans le cas d'une fibre optique monomode. Cela signifie simplement que la répartition de la lumière dans

Figure 9

Rayonnement laser injecté puis véhiculé dans une fibre optique. Une fibre optique dirige la lumière laser sur plusieurs dizaines de kilomètres.



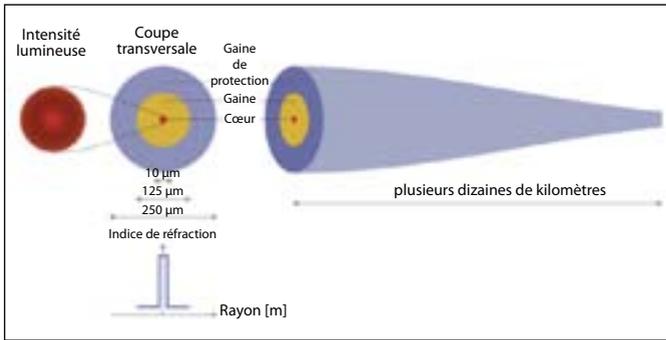


Figure 10

Dimensions caractéristiques d'une fibre optique et profil d'indice associé.

cette fibre prend une forme singulière et unique. La fonction mathématique caractéristique d'une fibre optique est appelée « profil d'indice ». Cette fonction dicte les propriétés électromagnétiques d'une fibre optique particulière. Elle est obtenue, en pratique, par un processus de synthèse chimique en voie gazeuse. Dans le cas d'une fibre optique monomode, cette fonction est généralement un simple « saut d'indice » comme le montre la **Figure 10**.

3 Fabrication de la fibre optique

L'impératif fondamental concerne les pertes de propagation, qui doivent être les plus faibles possibles. Le matériau doit aussi posséder une excellente résistance mécanique, thermique et chimique, et conserver ses propriétés dans le temps. La silice fondue (SiO_2) est alors un matériau de choix.

Comme on l'a vu précédemment, la fibre optique est composée d'au moins deux matériaux d'indices de réfraction différents. Cette différence est de l'ordre de

quelques centièmes. On peut obtenir ces petites valeurs de différences en ajoutant des éléments à la silice, selon un procédé appelé « dopage ». Il existe plusieurs éléments dopants. Les plus utilisés actuellement sont le germanium (Ge), l'aluminium (Al), le phosphore (P) et le fluor (F). L'indice de réfraction évolue avec la concentration molaire en dopant.

La fabrication se fait en deux étapes : la fabrication d'une préforme par dopage de la silice puis son étirage sous la forme d'une fibre optique dans une tour de fibrage.

3.1. Préparation de la préforme

La préforme elle-même est réalisée en plusieurs étapes dans un bâti semblable à celui de la **Figure 11**. Ce bâti complexe permet de maîtriser parfaitement les indices de réfraction respectifs des verres de cœur et de gaine. Le contrôle très précis de la concentration en éléments dopants permet l'ingénierie du profil d'indice qui peut être bien plus complexe qu'un simple saut d'indice.

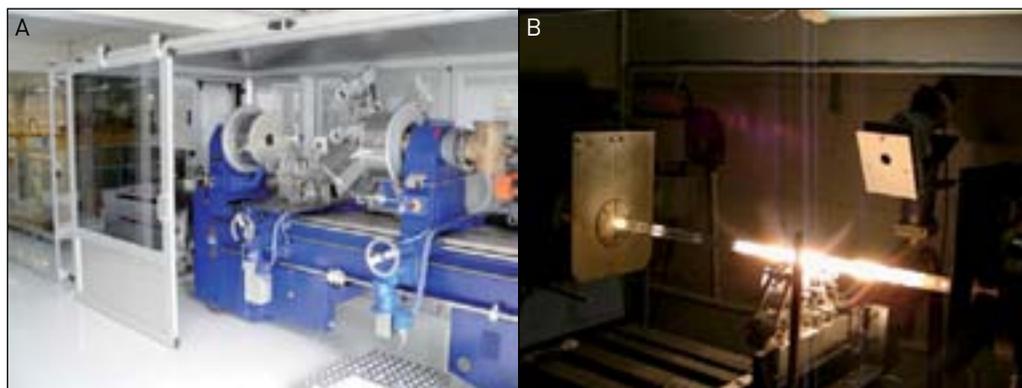


Figure 11

Bâti, siège de la fabrication des préformes (ingénierie de l'indice du verre par synthèse chimique (dopage) et synthèse de verres ultra-purs) : A) vue d'ensemble ; B) bâti MCVD en fonctionnement.

Pour réaliser la partie centrale de la préforme, on recourt à un procédé chimique garantissant des concentrations très faibles en impuretés (hydrogène et ions métalliques). On atteint des niveaux inférieurs à une impureté par milliard d'éléments, soit 10^{-7} % !

Dans la méthode de dépôt en phase vapeur (en anglais « *modified chemical vapour deposition process* », MCVD), on utilise un tube de silice très pure comme substrat pour le dépôt. Ensuite, on injecte les éléments dopants sous la forme d'halogénures gazeux ultra-purs (GeCl_4 , Al_2O_3 , POCl_3 , SiF_4), ainsi que de l'oxygène (O_2). En chauffant à très haute température (1 400 °C-1 600 °C), à l'aide d'un chalumeau, le tube substrat contenant les halogénures, une réaction d'oxydation a lieu. De fines suies de matière sont déposées en aval du chalumeau. Celui-ci est ensuite déplacé le long du tube substrat, passe sur les suies et les vitrifie. Lorsque le chalumeau a parcouru la longueur du tube, il

est ramené au début, puis le processus est répété. Chaque passage permet de déposer la matière sur une épaisseur de quelques microns sur la surface interne du tube. En raison de la symétrie cylindrique de la fibre optique, ce processus est réalisé alors que le tube est en rotation sur lui-même, autour de son axe longitudinal. En contrôlant les concentrations relatives des espèces, on ajuste très précisément le profil d'indice de réfraction de la fibre (Figure 12A).

En raison des très fines couches déposées, il est impossible en pratique de boucher le tube substrat (Figure 12B). Finalement, on rétreint² sous vide le tube, à nouveau à l'aide d'un chalumeau, pour le fermer selon le schéma de la Figure 12C. Cette opération de fermeture est l'étape la plus critique du processus puisqu'on peut provoquer un effondrement de la

2. La rétreinte est une opération d'emboutissage visant à réduire les dimensions d'un objet à parois minces sans modifier son épaisseur.

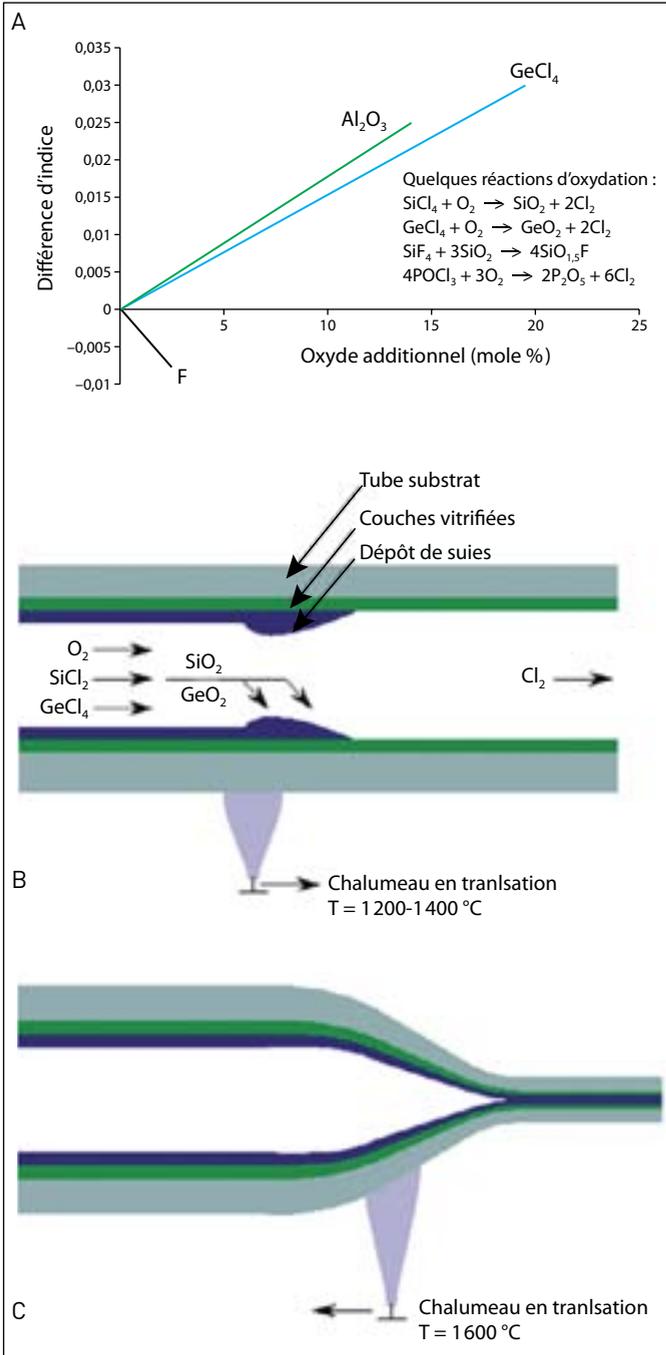
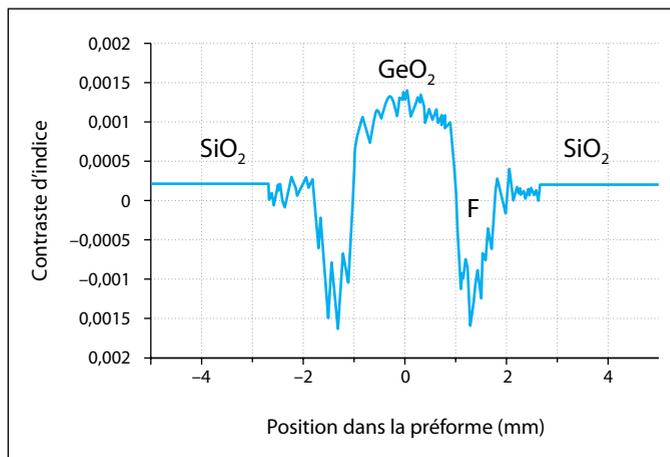


Figure 12

A) Différence d'indice en fonction de la concentration en oxyde pour trois halogénures couramment employés. Quelques équations d'oxydation mises en jeu dans ce procédé. B) Schéma de principe du dépôt en phase vapeur. C) Schéma de principe du rétreint de la préforme.

Figure 13

Profil d'indice de réfraction mesuré sur une tranche de préforme.



préforme et donc une déformation alors qu'il faut conserver des préformes totalement cylindriques.

La **Figure 13** montre la différence d'indice mesurée sur une tranche de préforme obtenue à partir d'un tube de silice à l'intérieur duquel on a injecté des halogénures de germanium et de fluor. Le profil n'est pas parfaitement régulier. On observe de légères variations dans les zones déposées, chacune reliée à un passage. Cette préforme a été réalisée à l'Institut de chimie des substances à haute pureté de l'Académie des Sciences de Russie.

3.2. Étirage de la préforme en fibre optique

Le fibrage de la préforme rétreinte est une simple opération de réduction de diamètre (homothétie radiale). Le profil d'indice est donc conservé lors de l'étirage. Le principe de conservation de la matière impose que $(L \times S)_{\text{préforme}} = (L \times S)_{\text{fibre}}$, où L et S représentent

respectivement la longueur et la surface sur une section transverse. Pour une préforme de longueur 1 m et de diamètre 3 cm, on obtient une fibre de longueur de près de soixante kilomètres pour un diamètre de 125 μm .

Le schéma de principe d'une tour de fibrage est décrit sur la **Figure 14**. La préforme est chauffée dans un four jusqu'à sa température de ramollissement (autour de 1 800 $^{\circ}\text{C}$). À cause de la gravité, l'extrémité chauffée tombe. Cette « goutte » est récupérée en bas de la tour, et coupée. Le mince fil de verre auquel elle était reliée et ensuite placé sur un tambour, appelé « recette ». La préforme est ensuite descendue dans le four de fibrage et la recette mise en rotation. La fibre peut alors être enroulée sur la recette tant qu'il reste de la préforme.

La **Figure 15** montre le processus de fibrage en cours. Comme indiqué sur la **Figure 14**, la tour de fibrage est agrémentée d'un certain

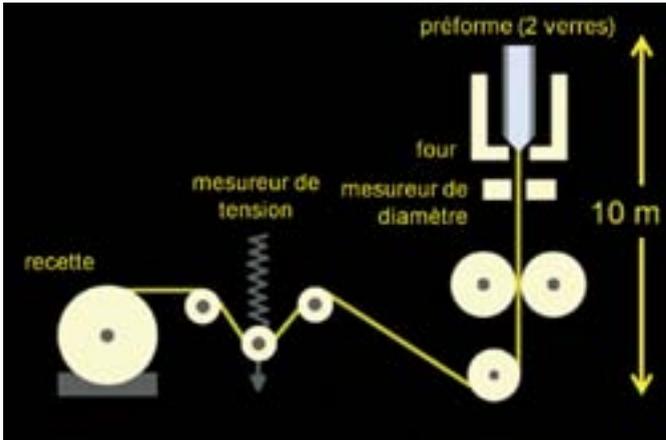


Figure 14

Schéma de principe d'une tour de fibrage pour l'étirage de la préforme sous la forme d'une fibre.

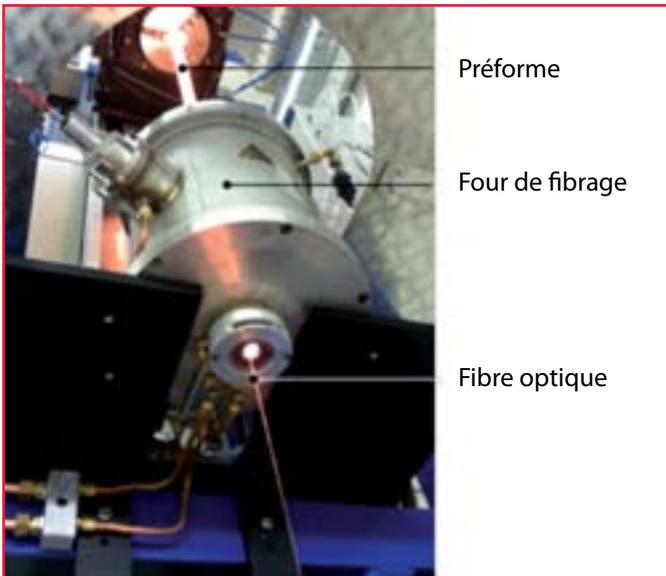


Figure 15

Photographie de la partie haute d'une tour de fibrage.
Source : photo XLIM.

nombre d'appareils permettant de mesurer, de manière dynamique en cours de fibrage, les paramètres de la fibre : diamètre de fibre et tension essentiellement, qui influent fortement sur le régime de propagation et sur les pertes. Aujourd'hui les pertes de propagation d'une fibre optique

« telecom-grade », c'est-à-dire employée dans les réseaux modernes, sont inférieures à 0,2 décibel par kilomètre à la longueur d'onde infrarouge de 1,55 micromètres. Pour comprendre le niveau de sophistication de ces composants et des matériaux qu'ils constituent, il faut réaliser que

cette transparence correspond à voir la flamme d'une bougie à travers une épaisseur de verre de 100 km. La silice synthétisée par voie chimique est ainsi le matériau le plus transparent au monde.

4 La transmission de l'information par fibre optique

La transmission de l'information par fibre optique repose sur le principe de la modulation de la lumière. De manière générale le faisceau lumineux issu d'un laser est d'abord modulé, en amplitude par exemple, puis injecté dans la fibre optique qui l'achemine jusqu'à sa destination finale. C'est le même principe qui était utilisé avec les signaux de fumée : au lieu d'avoir un nuage de fumée continu, on découpait le flux de fumée en petits nuages : leur taille, leur nombre, leur fréquence d'apparition formaient un signal qui avait un sens pour l'émetteur et le récepteur. Dans le cas des communications optiques modernes, le faisceau laser remplace le nuage continu de fumée ; des impulsions de lumière remplacent les petits nuages de fumée. Le code est toujours partagé entre émetteur et récepteur. On cherche sans cesse à augmenter la capacité totale du système, c'est-à-dire le volume d'informations que l'on peut transmettre en une seconde. On cherche ainsi à accroître la fréquence de répétition des impulsions, c'est-à-dire le débit du canal. Le débit actuel est de 10 gigabits par seconde, soit dix milliards d'impulsions

lumineuses transmises par seconde dans une seule fibre optique. À comparer au débit d'un système de communication optique par signal de fumée : sûrement moins d'un nuage par seconde !

Malgré ses performances exceptionnelles en tant que support de propagation, la fibre optique présente quelques défauts intrinsèques qu'il faut corriger. En particulier, les pertes de propagation sont certes faibles mais non nulles. Une atténuation en puissance de 0,2 dB/km signifie que 99 % de la puissance injectée à l'entrée de la fibre sont perdus après une distance de propagation de 100 km. En pratique, les liaisons doivent couvrir des distances bien plus grandes, comme par exemple les quelques 6 000 km qui séparent le continent européen de la côte Est des États-Unis. Il a donc fallu trouver un moyen de « régénérer » les signaux, fortement atténués. Pour cela, on utilise depuis les années 1990 un amplificateur de lumière, lui-même fondé sur une fibre optique. On utilise les propriétés de luminescence des ions de terres rares, des éléments de la famille chimique des lanthanides, sous forme d'ions trivalents (**Figure 16**). En particulier l'Erbium (Er^{3+}) a le bon goût d'émettre de la lumière justement à la longueur d'onde de 1,55 micromètres.

Pour réaliser une fibre amplificatrice, le cœur de la préforme est dopé avec des ions Er^{3+} lors d'une étape supplémentaire dans le processus de fabrication. Les couches de cœur sont rendues volontairement poreuses puis

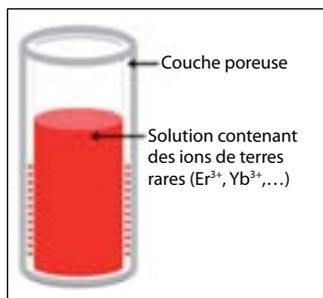


Figure 16

Lorsqu'on procède au dopage en solution de la préforme, les terres rares diffusent dans les pores : les ions « dopent » la silice et confèrent à la silice des propriétés de luminescence.

imprégnées d'une substance aqueuse contenant les ions de terre rare. La préforme est ensuite séchée et les couches de cœur contenant les ions Er^{3+} vitrifiées. Les étapes de rétreint et de fibrage sous les mêmes que dans le cas des fibres optiques de ligne. Les fibres optiques amplificatrices sont ensuite connectées aux fibres de lignes puis alimentées en énergie (optique). Les ions de terre rare restituent cette énergie sous la forme d'un rayonnement lumineux à la longueur d'onde de 1,55 micromètres. Selon le principe de l'émission stimulée découvert par Einstein, un signal lumineux à la même longueur d'onde peut ainsi être amplifié. Avec de la silice dopée par exemple à l'erbium, on peut obtenir des gains en puissance de l'ordre de mille sur des distances extrêmement faibles de l'ordre de dix mètres, ce qui permet de réaliser l'amplification nécessaire pour couvrir les milliers de kilomètres qui séparent les continents.

Les travaux pionniers du Français Emmanuel Desurvire sur les fibres amplificatrices de lumière dopées aux ions de terre rare ont depuis donné lieu à des applications dans d'autres domaines. En particulier, cette technologie est maintenant couramment utilisée pour réaliser des lasers. D'ailleurs, LASER est l'acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, soit amplification de la lumière par l'émission stimulée d'un rayonnement.

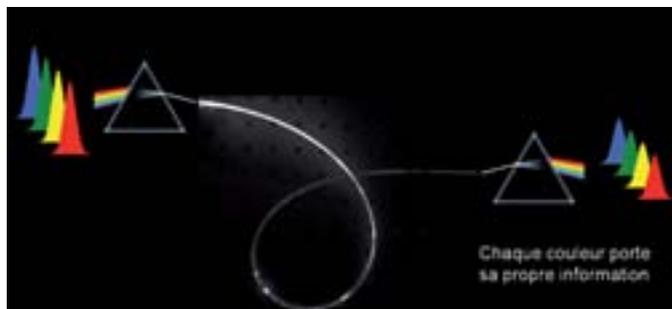
Les fibres de ligne et les fibres amplificatrices de lumière peuvent véhiculer ou amplifier simultanément plusieurs

rayonnements lasers, à des longueurs d'onde différentes mais toujours voisines de 1,55 micromètres. C'est ce que l'on appelle le multiplexage en longueur d'onde. Comme montré sur la **Figure 17**, tout se passe comme si on injectait plusieurs couleurs dans la liaison optique. L'intérêt réside dans le fait que chaque couleur porte sa propre information et que ces couleurs ne se mélangent pas. On peut donc retrouver ces informations en sortie de la ligne. Aujourd'hui, on peut injecter simultanément plusieurs dizaines de couleurs, ce qui augmente d'autant la capacité de la liaison optique.

Une fibre optique est un objet de dimensions transverses micrométriques, donc relativement fragile. Le déploiement de cette technologie pour les communications optiques a nécessité de longs travaux industriels pour assurer un fonctionnement optimal durant plusieurs années voire décennies. En particulier, il a fallu mettre au point des câbles très spécifiques, capables de résister à la pression dantesque qu'exerce une colonne d'eau de plusieurs kilomètres de hauteur lorsque ces câbles sont posés au fond des océans.

Figure 17

Schéma représentatif du multiplexage en longueur d'onde : l'injection simultanée de plusieurs lasers de couleurs différentes permet d'augmenter d'autant la capacité de la liaison.



5 Développement de la technologie des fibres optiques

La trajectoire de cette innovation de rupture (*Figure 18*) commence par des travaux de recherche académique, en laboratoire, conduits par quelques chercheurs brillants, dont le récent lauréat du prix Nobel de physique, Sir Charles Kao. Persuadé du bien-fondé de ses travaux, ce chercheur a réussi à convaincre les décideurs et leaders d'opinion de s'impliquer dans le développement industriel de la technologie. Les travaux à l'échelle industrielle des ingénieurs de l'entreprise Corning Glass Works et le développement des méthodes de synthèse chimique de verres ultra-purs ont permis d'envisager sérieusement l'application à grande échelle des fibres optiques aux télécommunications. La

production industrielle de milliers de kilomètres de fibres optiques a ainsi conduit à l'avènement du réseau Internet.

Que nous réserve l'avenir ? En raison des nouveaux usages, dont les réseaux sociaux, la vidéo à la demande..., la demande en volume de données double tous les dix-huit mois (*Figure 19*). Il faudrait donc que l'offre double tous les dix-huit mois, mais ce n'est pas le cas ! Il pourrait s'ensuivre une saturation du réseau actuel dans les dix ans qui viennent.

La pose de nouveaux câbles, d'ailleurs plus performants que les câbles installés, est une solution partielle à cette demande croissante (*Figure 20*). Une autre solution consiste à trouver un nouveau mode de multiplexage, complémentaire du multiplexage en longueur d'onde (*Figure 21*). Les chercheurs

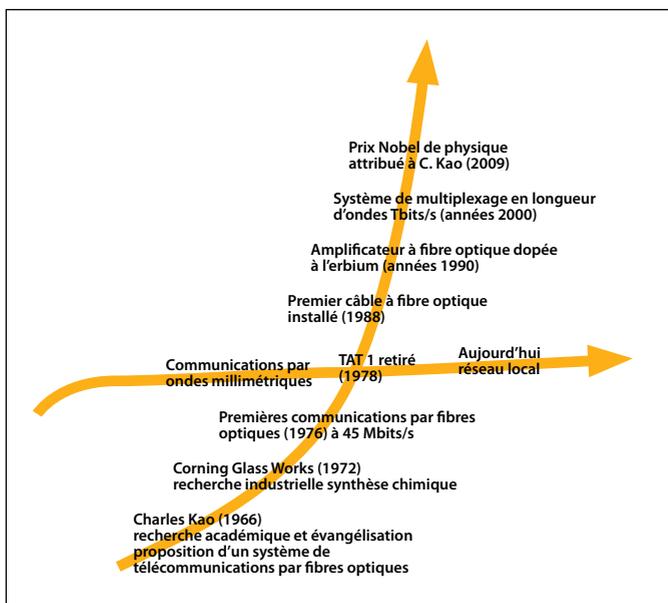


Figure 18

Histogramme de la recherche scientifique sur les fibres optiques.

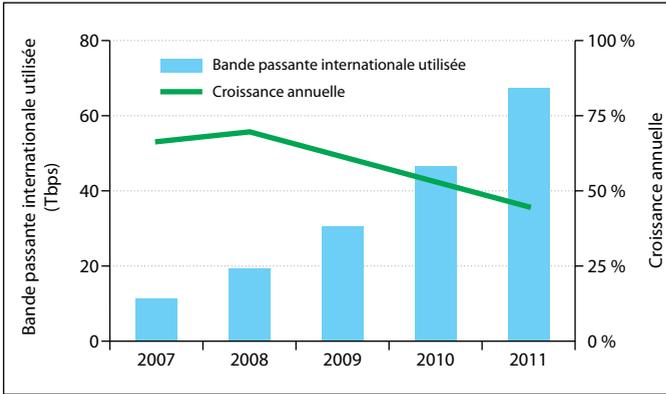


Figure 19

Évolution de l'offre et de la demande en télécommunications : la demande double tous les dix-huit mois !

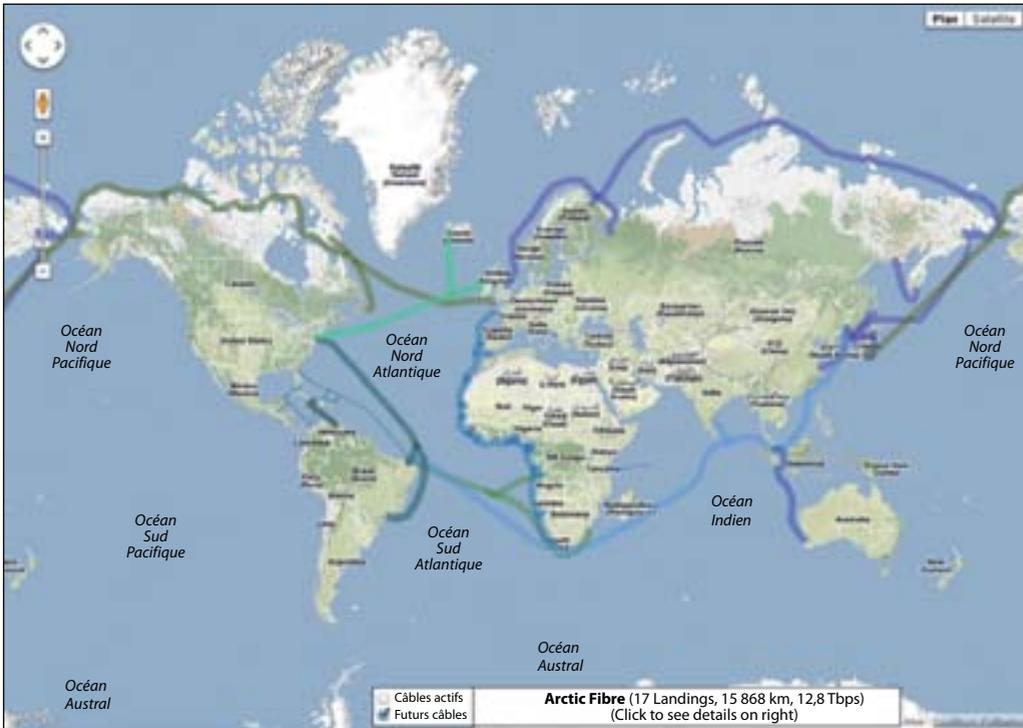


Figure 20

Répartition des nouveaux câbles de fibre optique sur la planète. Pour satisfaire la demande croissante, l'offre devrait doubler tous les dix-huit mois !

étudient depuis quelques années les possibilités offertes par le multiplexage spatial. Dans une fibre optique, la lumière se répartit sur des figures définies, appelées « modes ». Jusqu'à présent

nous nous sommes cantonnés à l'utilisation du mode fondamental, le plus simple à gérer. Mais en principe on pourrait très bien utiliser les modes d'ordre supérieur, et chacun de ces modes pourrait alors

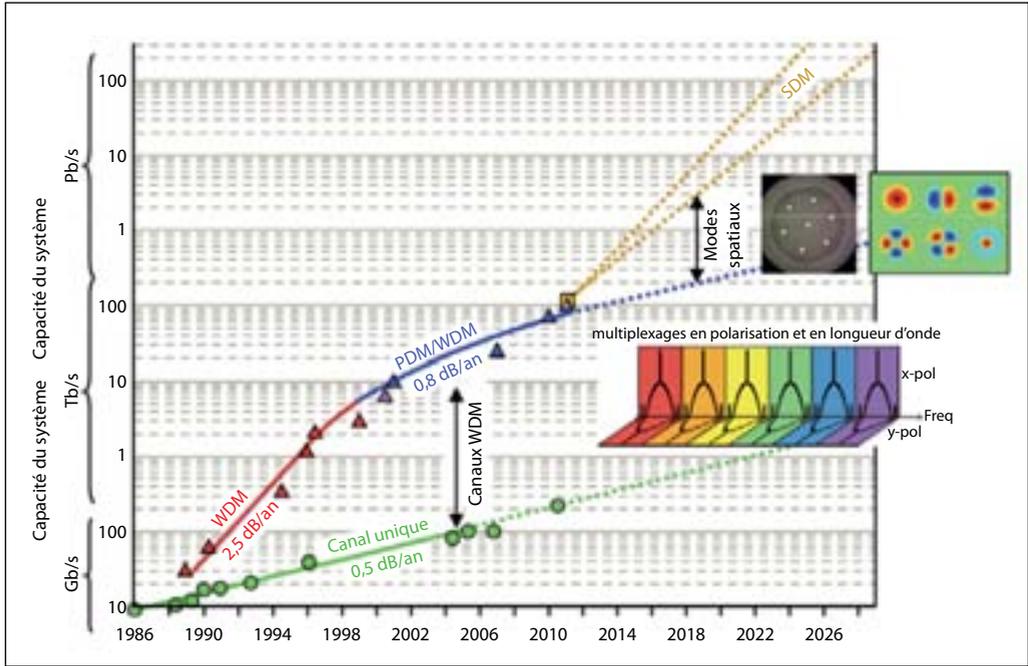


Figure 21

Débit des télécommunications optiques en fonction du temps. WDM = Wavelength-division multiplexing : multiplexage en longueur d'onde ; PDM = Polarization-division multiplexing : multiplexage en polarisation ; SDM = space-division multiplexing : multiplexage spatial.

véhiculer sa propre information. Cela sous-entend de revoir le processus de fabrication de ces fibres optiques et de concevoir de nouveaux composants d'extrémités. Cette possibilité, découverte en France dans les années 1980 puis tombée dans l'oubli, pourrait bien être une solution d'avenir pour répondre à la demande croissante et ainsi ouvrir de nouvelles perspectives pour l'industrie des télécommunications.

6 Les nouveaux champs d'application de la fibre optique

La technologie des fibres optiques est une *technologie diffuse* dont les applications à d'autres domaines que les télécommunications se sont

beaucoup développées ces dernières années. On peut citer par exemple la prospection pétrolière où des réseaux de fibres optiques sont utilisés pour sonder les puits de pétrole et en déterminer le volume.

On utilise aussi des fibres optiques dans le secteur de l'aviation. Une société française réalise des gyroscopes pour optimiser le géo-positionnement des hélicoptères par exemple.

Les fibres optiques sont aussi utilisées dans la soudure de précision. Dans une fibre optique, la lumière est répartie sur le cœur de dimensions micrométriques. Le faisceau laser arrive ainsi précisément sur la zone que l'on veut souder ou usiner. La fabrication des injecteurs de moteur diesel utilise cette technologie.

Les fibres optiques sont par ailleurs utilisées pour surveiller des infrastructures telles que des ponts. Des capteurs à fibres optiques distribués le long des bâtiments mesurent avec une très grande précision les variations de température, de contrainte, de pression que cet édifice subit au cours du temps (*Figure 22*).

À l'aide d'une fibre optique, on peut créer des flashes de lumière de plusieurs mégawatts ! Ces impulsions lumineuses sont obtenues en concentrant la lumière produite par des ions de terres rares au sein de la matrice de silice dans des volumes extrêmement faibles (diamètres de quelques micromètres). Cette puissance, bien qu'émise pendant quelques millièmes de seconde, correspond à 1/1 000 de celle d'une centrale nucléaire ! Au sein de notre laboratoire, XLIM, nous collaborons avec des chimistes afin d'optimiser la composition chimique de ces fibres optiques et repousser leurs limites en puissance. Nous structurons le profil d'indice de la fibre optique avec des oxydes variés dont l'oxyde de germanium, et dopons avec une terre rare (l'ytterbium par exemple) le cœur de la fibre. Cette structuration chimique à l'échelle micrométrique permet de générer ces impulsions lumineuses géantes (*Figure 23*). Ce type de laser pourrait être utilisé pour la chirurgie de l'œil. Une autre application d'avenir de ces lasers sera la chirurgie non invasive, qui consistera à utiliser la fibre optique non seulement comme moyen de générer ces impulsions, mais aussi



Figure 22

Des capteurs distribués à fibres optiques relèvent en temps réel les déformations d'un pont, d'un barrage, par exemple, et permettent de sécuriser ces infrastructures.

comme véhicule de la lumière pour guérir des tumeurs par exemple directement au centre du corps humain. Une autre application similaire est le micro-endoscope qui permet de réaliser une image de l'intérieur du corps humain et, éventuellement, de supprimer les biopsies.

En collaboration avec les chimistes du Centre Européen de la Céramique de l'université de Limoges, nous mettons au point de nouveaux matériaux avec l'objectif de décaler le spectre de transmission de la lumière de ces fibres vers

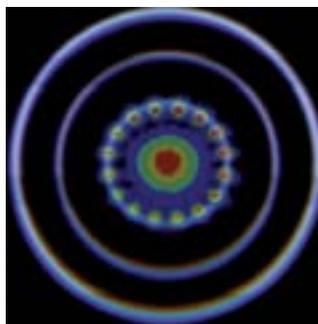


Figure 23

Une image prise au microscope de la section transversale d'une fibre optique microstructurée utilisée pour élaborer des lasers à impulsions géantes.

Figure 24

Vue de la face d'une fibre optique composée de nouveaux matériaux (PbO (40 %), Bi_2O_3 (27 %), Ga_2O_3 (14 %), SiO_2 (14 %), CdO (5 %)), réalisée en collaboration avec des chimistes.



l'infrarouge (Figure 24). On a réalisé des lasers infrarouges avec ces fibres mille fois plus brillants que le soleil ! Ce type de laser pourrait servir à détecter des espèces chimiques polluantes dans l'atmosphère, car ces espèces ont une absorption forte dans l'infrarouge.

Une étroite coopération entre chimistes et physiciens, clé des fibres optiques et des technologies de l'information de demain

La fibre optique est un composant clé des technologies de l'information et de la communication. Elle a permis l'avènement du réseau Internet que nous utilisons tous quotidiennement. Cette technologie ne peut continuer son extraordinaire développement qu'à travers une étroite coopération entre les physiciens qui conçoivent les fibres, à l'aide des mathématiques, et les chimistes, qui interviennent dans la préparation des matériaux ultra-purs de base. La chimie participera à l'amélioration des capacités de transmission de l'information et à la diversification des domaines d'applications de cette technologie, qui passe nécessairement par une liaison étroite entre les laboratoires de recherche et l'industrie.