

# Verres et polymères pour l'optique guidée

Jean-Luc Adam

## Summary

### Glasses and polymers for guided optic

This chapter deals with silica optical fibers, non-conventional fibers (fluorides, chalcogenides, polymers) and glass waveguides for integrated optics. The article is presented in the view points of the materials (chemical compositions, physical properties), of their shaping (fibers, planar waveguides) and their applications.

## Mots-clés

**Silice, fluorures, chalcogénures, fibres, guides d'ondes.**

## Key-words

**Silica, fluorides, chalcogenides, fibres, waveguides.**

Les matériaux pour l'optique guidée représentent une vaste famille qui inclut les verres de silice, les verres non oxydes, les polymères, ainsi que des phases cristallisées tels le niobate de lithium et les halogénures d'argent. Dans un souci d'unité, cet article va se focaliser sur les systèmes amorphes, verres et polymères, les structures guidantes réalisées à partir de ces matériaux étant des fibres à structure cœur-gaine ou des guides d'onde planaires. Les caractéristiques des matériaux, les techniques mises en œuvre dans l'élaboration des guides ainsi que les applications spécifiques de chacun sont présentées.

## Fibres de silice

Lorsque l'on parle de fibres optiques, les fibres de silice viennent immédiatement et à juste titre à l'esprit. Ce sont en effet les plus connues, en raison du développement sans précédent des réseaux de télécommunication par voie optique.

La silice,  $\text{SiO}_2$ , se caractérise par une température de transition vitreuse élevée, voisine de  $1\,200\text{ °C}$  et un coefficient de dilatation,  $\alpha$ , très faible ( $5 \cdot 10^{-7}\text{ K}^{-1}$ ), ce qui lui confère une très bonne résistance aux chocs thermiques. Les applications télécom imposent l'emploi de silice ultrapure pour la réalisation de fibres à très faibles pertes optiques. Celle-ci est obtenue par oxydation en phase vapeur de tétrachlorure de silicium, lui-même ultrapur, suivant la réaction  $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2$ . La fibre est tirée à partir d'une préforme constituée de silice seule pour la gaine et de silice dopée  $\text{GeO}_2$ , par exemple, pour le cœur. La fonction du germanium est d'augmenter l'indice de réfraction du verre de cœur et assurer ainsi le guidage de la lumière dans la fibre. Dans la phase de tirage, la préforme est maintenue verticalement dans la tour de fibrage et chauffée à son extrémité inférieure à une température  $T > 2\,000\text{ °C}$ . Lors de cette opération, par laquelle une préforme de quelques centimètres de diamètre est transformée en une fibre de  $125\ \mu\text{m}$ , le rapport entre les diamètres de cœur et de gaine est conservé. La *figure 1* donne la courbe d'atténuation d'une fibre de silice commerciale. Les pertes optiques atteignent un minimum de  $0,2\text{ dB/km}$  à la longueur d'onde de  $1,55\ \mu\text{m}$ , ce qui correspond au minimum

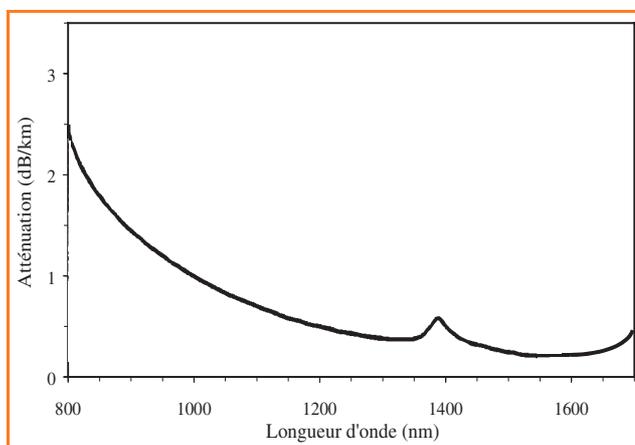


Figure 1 - Courbe d'atténuation d'une fibre de silice commerciale monomode.

théorique d'atténuation de la silice. D'origine intrinsèque, ces pertes minimales sont dues à la diffusion Rayleigh combinée à l'absorption multiphonon. En revanche, le pic d'absorption situé vers  $1\,400\text{ nm}$  est lié à la présence de groupements OH résiduels dans la silice.

Les fibres de silice sont employées essentiellement en tant que fibres de ligne pour le transport des signaux à haut débit. Cependant, même faiblement atténués, les signaux à  $1,55\ \mu\text{m}$  doivent être régénérés tous les  $80\text{ km}$  environ. Cette fonction est idéalement remplie par les amplificateurs optiques à fibre dopée par des ions de terre rare dont le principe est donné *figure 2*. Le signal qui se trouve atténué en fin de fibre de ligne est injecté dans la fibre amplificatrice, dopée  $\text{Er}^{3+}$  pour l'amplification à  $1,55\ \mu\text{m}$ . Celle-ci est pompée par un laser de manière à atteindre les conditions d'émission stimulée et provoquer ainsi l'amplification du signal, lequel est ensuite réinjecté dans un nouveau tronçon de fibre de ligne. Des gains supérieurs à  $50\text{ dB}$  dans la bande à  $1,55\ \mu\text{m}$  ont été mis en évidence, avec des facteurs de bruits de seulement  $3\text{ dB}$ . Le multiplexage en longueur d'onde requiert par ailleurs une égalisation du gain, typiquement entre  $1\,530$  et  $1\,565\text{ nm}$ , réalisée par filtrage à l'aide de réseaux de Bragg inscrits dans la fibre.

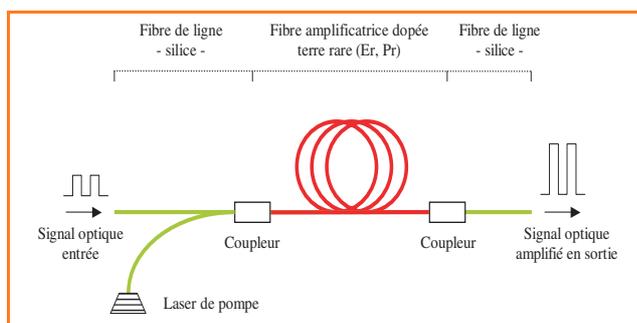


Figure 2 - Principe d'un amplificateur optique à fibre dopée terre rare.

## Fibres non conventionnelles

### Verres de fluorures

Les verres de fluorures se distinguent fondamentalement des oxydes par leurs compositions chimiques totalisant 100 % de fluorures de métaux lourds. Le verre de prédilection pour la réalisation de fibres optiques est incontestablement le verre ZBLAN dont les caractéristiques physico-chimiques sont données dans le *tableau I*. Moins fortes que les liaisons métal-oxygène, les liaisons métal-fluor confèrent aux verres de fluorures des températures caractéristiques plus basses que celles des verres d'oxydes. Ainsi, la température de transition vitreuse,  $T_g$ , de ZBLAN se situe aux environs de 260 °C et les températures de cristallisation,  $T_x$ , et de fusion,  $T_f$ , sont respectivement de 352 et 455 °C. ZBLAN est cependant un verre stable avec une faible tendance à la recristallisation. La plupart des verres de fluorures présentent des indices de réfraction,  $n_D$ , de l'ordre de 1,5. L'augmentation de l'indice dans le cœur des fibres est obtenue par l'addition d'éléments lourds et polarisables comme  $Pb^{2+}$ .

La transparence infrarouge est une propriété bien spécifique des verres de fluorures. Les courbes de transmission représentées à la *figure 3* montrent qu'ils transmettent la lumière jusque 6-8  $\mu m$  dans l'infrarouge moyen, suivant la nature des cations constituant le verre. On peut noter que cela représente un décalage vers les grandes longueurs d'onde de près de 3  $\mu m$  par rapport à la silice. La limite de transmission IR est le résultat de processus d'absorptions multiphonons liés aux fréquences fondamentales de vibrations des matériaux. Pour un verre de fluorures tel que ZBLAN, l'absorption multiphonon est essentiellement le fait des vibrations Zr-F à 580  $cm^{-1}$ . Dans le cas de la silice, les vibrations Si-O, de plus haute énergie (1 100  $cm^{-1}$ ), sont

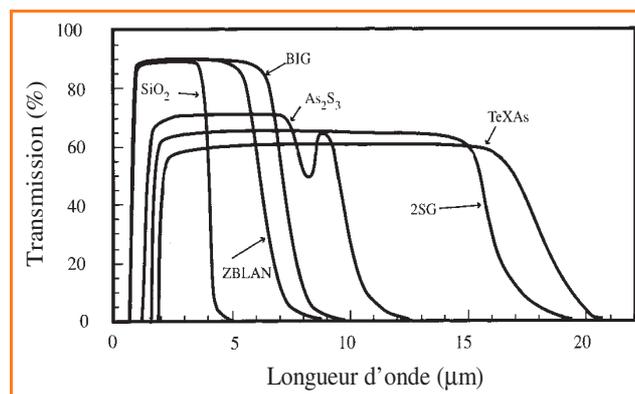


Figure 3 - Spectres de transmission des verres de silice, fluorures et chalcogénures.

responsables de la position de la limite IR à environ 3  $\mu m$ . Les verres de fluoroindates tels que BIG ( $BaF_2$ - $LnF_3$ - $GaF_3$ ) présentent quant à eux un décalage de plus de 1,5  $\mu m$  par rapport à ZBLAN. Ceci s'explique par la présence de vibreurs de plus faible énergie comme In-F à  $\approx 510 cm^{-1}$ . Les fibres de verre ZBLAN sont habituellement tirées à partir d'une préforme, laquelle est obtenue par coulée successive des verres de gaine et de cœur. La plus faible atténuation mesurée sur une fibre ZBLAN est de 0,45  $dB \cdot km^{-1}$  à la longueur d'onde de 2,35  $\mu m$ . Ce résultat a cependant été obtenu avec un tronçon de 60 mètres seulement, les performances se dégradant avec la longueur de la fibre. L'emploi des fibres de fluorures se limitera donc aux applications courtes et moyennes distances, c'est-à-dire aux fibres sources laser et fibres pour amplificateurs optiques.

Du point de vue des applications télécom, les besoins toujours croissants en termes de débits requièrent la mise au point de systèmes amplificateurs sur l'ensemble de la bande à faible atténuation de la silice, c'est-à-dire entre 1,2 et 1,7  $\mu m$ . Les fibres de verre ZBLAN dopées praséodyme ( $Pr^{3+}$ ) permettent notamment l'amplification au voisinage de 1,3  $\mu m$ . Des gains de l'ordre de 30 dB associés à des rendements de 0,1 à 0,2 dB/mW ont été démontrés. Des amplificateurs ZBLAN: $Pr^{3+}$  ont été employés avec succès dans des systèmes prototypes de distribution locale à partir d'une antenne de réception centrale (CATV).

Le rendement quantique du niveau  $^1G_4$ , dont est issue la transition à 1,3  $\mu m$  du praséodyme, est très dépendant de la nature de la matrice, à tel point qu'il est nul dans les matrices à énergie de phonon élevée telles que la silice et voisin de 3 % seulement dans ZBLAN. Par ce même principe,

Tableau I - Composition chimique et propriétés physiques des verres non oxydes pour l'optique guidée. Les indices de réfraction,  $n$ , sont : (a) mesurés à la raie D du sodium, (b) mesurés à 10  $\mu m$ , (c) estimés à partir du spectre de transmission.  $d$  : densité ;  $\alpha$  : coefficient de dilatation thermique.

Verre	Composition (% mol)	$T_g$ ( $\pm 2$ °C)	$T_x$ ( $\pm 2$ °C)	$T_f$ ( $\pm 3$ °C)	$d$ ( $\pm 0,02$ ) ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$n$	$\alpha$ ( $\pm 6 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ )
ZBLAN	53 ZrF <sub>4</sub> - 20 BaF <sub>2</sub> - 4 LaF <sub>3</sub> - 3 AlF <sub>3</sub> - 20 NaF	262	352	455	4,34	1,498 <sup>(a)</sup>	200
PZG	35,3 PbF <sub>2</sub> - 23,5 ZnF <sub>2</sub> - 34,3 GaF <sub>3</sub> - 4,9 YF <sub>3</sub> - 2 AlF <sub>3</sub>	270	325	547	$\approx 5,5$	1,59 <sup>(a)</sup>	170
TeXAs	Te <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> As <sub>4</sub>	118	-	-	-	2,8741 <sup>(b)</sup>	270
TAS	Te <sub>2</sub> As <sub>3</sub> Se <sub>5</sub>	137	-	-	-	$\approx 2,8$ <sup>(c)</sup>	230

l'amplification de signaux optiques autour de  $1,47 \mu\text{m}$  à l'aide de la transition  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$  de l'ion  $\text{Tm}^{3+}$  devient possible avec une fibre ZBLAN. Un prototype combinant des amplificateurs de nature différente (ZBLAN: $\text{Tm}^{3+}$ , silice: $\text{Er}^{3+}$  et Raman) a permis récemment l'amplification de signaux sur une bande large, mais discontinue, entre 1 297 et 1 604 nm.

### Verres de chalcogénures

Suivant leur composition chimique, les verres de chalcogénures appartiennent à deux familles distinctes. D'une part, les verres qui acceptent d'être dopés par les ions de terres rares ; ce sont essentiellement des verres à base de sulfures ou séléniures de germanium ou de gallium. D'autre part, les verres non dopables qui présentent en revanche un très large domaine de transmission dans l'infrarouge, jusque  $15\text{-}18 \mu\text{m}$  suivant la composition chimique. Ils contiennent en général des proportions importantes de tellure ou de sélénium associés à l'arsenic ou à l'antimoine. Les verres de la première catégorie trouveront des applications en optique active, alors que les seconds seront utilisés en optique passive, en particulier dans le domaine des grandes longueurs d'onde. Nous nous limiterons ici à cette seconde famille représentée par les verres TeXAs et TAS dans le *tableau 1*. Ces compositions se caractérisent par une température de transition vitreuse relativement basse, avec  $T_g = 118 \text{ }^\circ\text{C}$  pour TeXAs et  $137 \text{ }^\circ\text{C}$  pour TAS. Il convient de remarquer que ces deux verres ne cristallisent pas dans les conditions standards.

Obtenir des fibres de chalcogénures à partir d'une préforme nécessite la préparation préalable d'un barreau pour le verre de cœur et d'un tube pour le verre de gaine. Les deux pièces sont synthétisées en ampoule scellée, le tube étant formé par centrifugation pendant la phase de refroidissement du verre. Après recuit, le barreau est introduit dans le tube – on parle de méthode « barreau-tube » – et la préforme ainsi constituée est fibrée de façon classique. La technique du double creuset est une autre méthode applicable aux verres de chalcogénures. Le principe consiste à tirer la fibre directement à partir des verres de gaine et de cœur portés à la fusion dans deux creusets concentriques. Les bains sont maintenus sous atmosphère contrôlée, typiquement de l'argon. La procédure de tirage peut éventuellement être assistée par la pression relative au-dessus de chaque bain. Des pertes optiques de l'ordre de  $0,5 \text{ dB/m}$  ont été mesurées sur une fibre cœur-gaine de verre TeXAs. Ce niveau de perte relativement élevé est caractéristique des fibres de chalcogénures et n'autorise que des applications à courte distance.

Avec un domaine de transparence qui s'étend vers les grandes longueurs d'onde (*figure 3*), les verres de chalcogénures lourds sont bien adaptés aux applications d'imagerie thermique, de vision de nuit par caméra infrarouge, de radiométrie et aussi de capteurs chimiques pour l'analyse déportée par fibre optique. Le domaine des capteurs, dont le principe est basé sur l'absorption des ondes évanescentes, constitue un champ d'applications majeur pour les fibres optiques infrarouges. Un grand nombre d'espèces de la chimie organique ou biologique absorbent en effet entre  $3$  et  $13 \mu\text{m}$ , domaine de travail des fibres de verre TeX. La signature des liaisons C-H par exemple se situe entre  $3,3$  et  $3,5 \mu\text{m}$ , celle de C-OH vers  $9,5 \mu\text{m}$ , et C-Cl aux alentours de  $12,5 \mu\text{m}$ .

Un spectromètre spécialement adapté pour la détection de ces entités est décrit à la *figure 4*. Le capteur est constitué

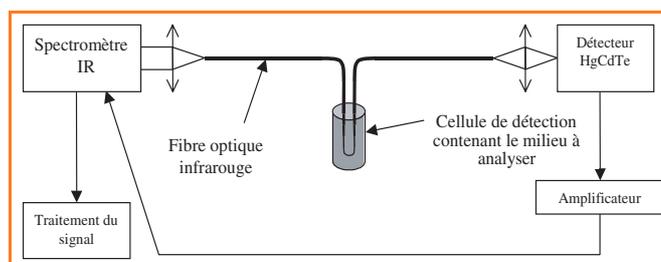


Figure 4 - Spectromètre IR à fibre de chalcogénures ; application à l'analyse déportée par absorption d'ondes évanescentes.

d'une fibre mono-indice, amenée en contact linéaire avec le milieu à analyser. Celui-ci peut être un liquide, un gel ou un tissu biologique. Le rayonnement issu d'une source infrarouge est injecté à une extrémité de la fibre. À l'interface entre la fibre et le milieu environnant, les ondes évanescentes sont absorbées sélectivement en fonction des modes de vibration du milieu. Un détecteur HgCdTe refroidi permet de collecter le spectre en sortie de fibre, lequel est ensuite analysé par un spectromètre à transformée de Fourier. Grâce à un étalonnage préalable, le système autorise non seulement la détection de groupements chimiques mais également leur analyse quantitative. Le suivi de réactions biochimiques comme la fermentation lactique ou la vinification a été démontré, ouvrant la voie à des applications dans le domaine agroalimentaire. La chimie industrielle peut également tirer profit de cette technologie. Étant une méthode non destructive, la spectroscopie déportée par ondes évanescentes est par ailleurs une technique prometteuse pour l'analyse de tissus vivants, avec la perspective d'établir un diagnostic précoce dans le cas de pathologies cancéreuses notamment.

### Polymères

L'intérêt des fibres optiques polymères (FOP) réside dans leur faible coût par rapport aux fibres de silice et dans leur facilité de mise en œuvre, à savoir robustesse, flexibilité, faible poids et connectique plus aisée.

Les fibres polymères de première génération sont de type saut d'indice et sont composées de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) pour le cœur et d'un polymère fluoré pour la gaine. Les indices de réfraction respectifs sont typiquement de  $1,49$  et  $1,40$ , ce qui se traduit par des ouvertures numériques élevées de l'ordre de  $0,50$ . Les FOP sont obtenues soit par coextrusion des polymères de gaine et de cœur, soit par tirage d'une préforme élaborée au préalable par la technique « barreau-tube » citée précédemment. Au final, ce type de fibre présente un diamètre de cœur de l'ordre de  $1 \text{ mm}$ , la gaine optique ayant une épaisseur de quelques  $10 \mu\text{m}$  seulement. Une courbe d'atténuation caractéristique d'une fibre PMMA est donnée *figure 5*. Les pertes optiques au minimum d'atténuation sont de l'ordre de  $70 \text{ dB/km}$  dans le domaine visible, à  $520$  et  $570 \text{ nm}$ . Un minimum relatif est observé par ailleurs à  $650 \text{ nm}$ .

Compte tenu du niveau relativement élevé des pertes, l'utilisation des FOP est limitée à des applications courtes et moyennes distances telles qu'éclairage déporté, transport d'images par faisceau de fibres, capteurs, et aussi transmission de données par voie optique à l'échelle des réseaux locaux. Récemment, la transmission d'un signal à  $520 \text{ nm}$ , à un débit de  $30 \text{ Mbits/s}$ , via un tronçon de  $100 \text{ m}$  de fibre PMMA a été démontrée.

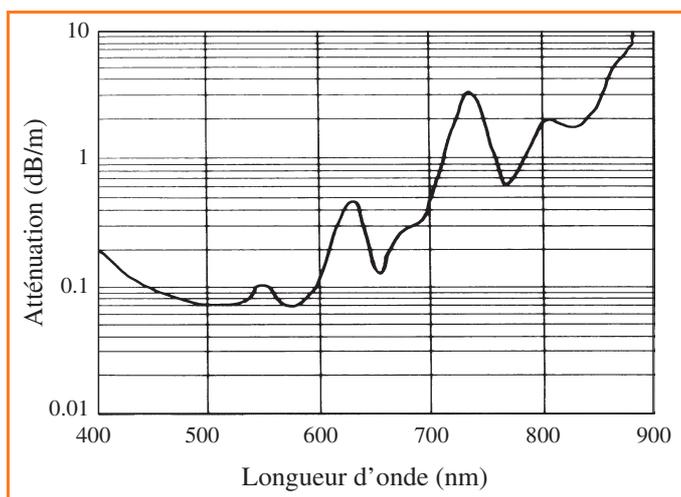


Figure 5 - Courbe d'atténuation d'une fibre optique polymère en PMMA,  $\varnothing_{\text{cœur}} = 1 \text{ mm}$  (d'après documentation Toray).

L'atténuation importante des fibres de PMMA dans le rouge et le proche IR est due aux harmoniques des différents modes de vibration des liaisons C-H. L'amélioration de ce paramètre impose un décalage de la transmission du polymère vers les grandes longueurs d'onde. Comme dans le cas des verres inorganiques, cela passe par la mise au point de matériaux à faible fréquence fondamentale de vibration, tels que les polymères perfluorés, où tous les hydrogènes ont été substitués par des fluorures, éléments plus lourds. Les fibres correspondantes présentent une atténuation de 40 dB/km environ à 1,3  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire dans un domaine spectral directement compatible avec les réseaux de télécommunication par fibres de silice. La mise au point de structures à gradient d'indice permet de plus de limiter la dispersion modale inhérente au caractère multimode des FOP. Les démonstrations les plus probantes en termes de débit et distance de transmission par FOP à gradient d'indice sont ainsi de 2,5 Gbit/s sur 450 m et de 11 Gbit/s sur 100 m. Ces deux résultats ont été obtenus à 1,3  $\mu\text{m}$ .

### Guides optiques intégrés

L'optique intégrée se positionne comme un complément indispensable des fibres dans les systèmes de communication optique, avec pour objectif de rassembler sur un même support des composants tels que diviseurs de faisceaux, coupleurs, multiplexeurs de longueurs d'onde, amplificateurs, etc.

### Verres d'oxydes

L'optique intégrée sur verre d'oxydes est une technologie mature dont sont issus bon nombre de composants optoélectroniques disponibles sur le marché. La silice s'avère être ici encore un matériau particulièrement bien adapté, puisqu'elle peut être déposée directement sur un substrat silicium, tout en conservant ses qualités optiques et thermomécaniques exceptionnelles. Cependant, l'indice de réfraction élevée du silicium ( $> 3,5$ ), fait que la couche guidante ne peut se trouver en contact optique avec celui-ci. Une structure intégrée type sera donc constituée d'une couche  $\text{SiO}_2$  sur Si que l'on peut qualifier de couche tampon, du guide proprement dit en silice dopée  $\text{TiO}_2$  ou  $\text{GeO}_2$  pour

l'augmentation d'indice, et d'une couche supérieure en silice non dopée. Le dépôt des différentes couches est réalisé par une méthode qui s'apparente à celle employée pour la réalisation de préformes, à savoir l'oxydation préalable de gaz précurseurs chlorés ( $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{TiCl}_4$ ), suivie d'une densification à haute température des particules de silice ainsi formées. Le débit relatif du gaz « dopant » permet de contrôler l'indice de réfraction du cœur. Le guide est par ailleurs délimité en largeur par photolithographie et gravure chimique. Des pertes  $< 0,02 \text{ dB/cm}$  sur des circuits optiques longs de 10 mètres et présentant une variation d'indice de 0,45 % ont été démontrées.

Les verres de silicates, ainsi que les verres de phosphates, sont d'autres matériaux à partir desquels il est possible de réaliser des guides d'ondes planaires de grande qualité. L'augmentation de l'indice de réfraction est ici le résultat d'un traitement par échange ionique à la surface du verre, un cation du verre,  $\text{Na}^+$  dans la plupart des cas, étant remplacé par un ion plus polarisable  $\text{M}^+ = \text{K}^+$ ,  $\text{Ag}^+$  ou  $\text{Tl}^+$  par exemple. Celui-ci est apporté sous la forme du nitrate correspondant ( $\text{MNO}_3$ ) en bain fondu, et l'interdiffusion  $\text{M}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  au travers d'un masque métallique (Al) aboutit à la formation d'un guide d'ondes à gradient d'indice. Les pertes par propagation à 1,55  $\mu\text{m}$  d'un guide silicate échangé sont typiquement  $< 0,1 \text{ dB/cm}$ .

En matière de guides d'ondes actifs, plusieurs systèmes lasers ont été mis en évidence, en particulier avec  $\text{Nd}^{3+}$  à 1,05 et 1,33  $\mu\text{m}$ , avec  $\text{Er}^{3+}$  à 1,55  $\mu\text{m}$ , aussi bien dans des guides silice sur silicium que des guides silicates par échange ionique. Concernant les phosphates, pour lesquels la solubilité en ions terres rares est supérieure à celle des silicates, des puissances laser de 160 mW à 1,54  $\mu\text{m}$  ont été extraites de guides de 20 mm de long seulement, co-dopés  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ . Les amplificateurs optiques intégrés opérant dans la bande télécom à 1,55  $\mu\text{m}$  avec des gains de 10-15 dB sont, quant à eux, des produits commerciaux.

### Verres de fluorures

Des guides d'ondes en verres de fluorures ont été réalisés par le biais de deux techniques bien distinctes : le dépôt en phase vapeur et l'échange ionique.

Les techniques de dépôt en phase vapeur (DPV) se sont révélées bien adaptées au cas du verre PZG, décrit dans le *tableau 1*, dont les composants principaux –  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{ZnF}_2$  et  $\text{GaF}_3$  – présentent des courbes de pression de vapeur voisines. Un bain de verre PZG peut donc être évaporé de façon congruente et des couches minces sont obtenues par dépôt de la phase vapeur sur un substrat approprié, par exemple ZBLAN ou  $\text{CaF}_2$ . Des guides PZG monomodes à 632,8 nm, de section ( $5 \times 1$ )  $\mu\text{m}^2$  ont ainsi été élaborés. Le cas échéant, ceux-ci sont rendus actifs par l'évaporation simultanée d'un fluorure ou chlorure de terre rare avec le verre de cœur.

Les techniques d'échange ionique ont permis également la mise en œuvre de structures guidantes planaires sur verre de fluorures. Les meilleurs résultats ont été obtenus par échange anionique sur verre ZBLA (i.e. ZBLAN sans fluorure de sodium) entre les ions  $\text{F}^-$  du verre et des ions  $\text{Cl}^-$  apportés par un balayage gazeux Argon-HCl. L'introduction d'ions chlorures, plus polarisables que les ions fluorures, provoque une augmentation de l'indice de réfraction dans la zone échangée. Le processus d'échange se produit à une température voisine de la température de transition vitreuse. Le confinement du guide est obtenu par des techniques de

photolithographie classique subordonnées toutefois au dépôt préalable d'un masque de silice sur la surface de l'échantillon à échanger. La méthode a permis de réaliser des guides monomodes à 830 nm.

Des gains internes de 1 à 1,5 dB/cm à 1,54  $\mu\text{m}$  ont été mesurés sur des guides canaux de verre de fluorures ZBLA et PZG dopé  $\text{Er}^{3+}$ .

### Polymères

L'avantage des polymères pour la technologie planaire se situe au niveau de leur bonne transparence sur les courtes distances, associée à une mise en forme plus aisée *a priori* que celle des verres inorganiques. La motivation principale est de mettre au point des circuits intégrés bas-coût pour les télécommunications à 1,3 et 1,55  $\mu\text{m}$  et le transport de données dans les systèmes informatiques.

Les matériaux utilisés sont le PMMA, les polymères fluorés, perfluorés, voire chlorés. Les techniques employées pour l'inscription de guides relèvent de la photolithographie traditionnelle (dépôt, masquage et gravure), ou de méthodes basées sur les capacités de micro-moulage des matériaux plastiques. Une de ces techniques consiste à former dans un premier temps des canaux dans le polymère de gaine, du PMMA par exemple, par réplique inverse d'un moule maître. Puis, les canaux sont remplis du matériau monomère de cœur, lequel est ensuite polymérisé par rayonnement UV. Cette méthode autorise une production de masse des guides polymères et permet de plus d'imprimer simultanément dans le polymère de gaine des canaux d'alignement pour la connexion de fibres. Parmi les structures réalisées, on peut citer des diviseurs monomodes 1 x 8 de section (6 x 6)  $\mu\text{m}^2$  opérant à 1,31  $\mu\text{m}$  et des coupleurs multimodes 4 x 4 de section (50 x 50)  $\mu\text{m}^2$ . Cependant, dans la perspective de couplage à des fibres télécom monomodes, le contrôle rigoureux de l'ouverture numérique des guides polymères devient un paramètre crucial. La copolymérisation de monomères à teneur différente en fluor permet d'ajuster l'indice de réfraction, celui-ci diminuant lorsque la concentration en fluor augmente. Des guides de polyimides fluorés ont été préparés par cette méthode. Thermiquement stables ( $T_g \approx 300$  °C), ils présentent des pertes optiques de 0,5 dB/cm à 1,55  $\mu\text{m}$ .

La variation significative de l'indice de réfraction des polymères avec la température autorise par ailleurs la réalisation de commutateurs thermo-optiques. D'autres développements des guides polymères concernent la réalisation de réseaux de diffraction de Bragg, de sources laser et d'amplificateurs. Un résultat récent fait état d'un gain

de 8 dB mesuré à la longueur d'onde de 1,06  $\mu\text{m}$  dans un guide multimode de polyimide dopé  $\text{Nd}^{3+}$ .

#### Jean-Luc Adam

est directeur de recherche au CNRS\*.



\* Laboratoire des Verres & Céramiques, UMR CNRS 6512, Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.  
Tél. : 02 23 23 62 62. Fax : 02 23 23 56 11.  
jean-luc.adam@univ-rennes1.fr  
<http://www.verceram.univ-rennes1.fr/>

### Pour en savoir plus

- Hewak D., *Properties, processing and applications of glass and rare-earth doped glasses for optical fibres*, INSPEC, Londres, **1998**, vol. 22.
- Adam J.-L., Optical properties and applications of fluoride glasses, *Advanced Inorganic Fluorides: Synthesis, Characterization and Applications*, éd. T. Nakajima, B. Zemva, A. Tressaud, Elsevier, Amsterdam, **2000**, p. 235.
- Sanghera J.S., Shaw L.B., Busse L.E. et coll., Development and infrared applications of chalcogenide glass optical fibers, *Fiber and Integrated Optics*, **2000**, 19, p. 251.
- Marcou J., Les fibres optiques plastiques perfluorées et à gradient d'indice, *Rev. Électric. Électron.*, **1998**, 3, p. 84.
- Righini G.C., Passive and active glasses for integrated optics, *From Galileo's occhialino to optoelectronics*, éd. P. Mazzoldi, World Scientific, Singapour, **1993**, p. 272.
- Eldada L., Shacklette L.W., Advances in polymer integrated optics, *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **2000**, 6, p. 54.
- Glass A.M., DiGiovanni D.J., Stasser T.A. et coll., Advances in fiber optics, *Bell Labs Techn. Journal*, janv.-mars **2000**, p. 168.
- Hocdé S., Boussard-Plédel C., Le Coq D., Fonteneau G., Lucas J., Remote analysis using IR glass fibers, *S.P.I.E.*, **1999**, 3849, p. 50.
- Bayart D., Baniel P., Bergonzo A. et coll., Broadband optical fibre amplification over 17.7 THz range, *Electron. Lett.*, **2000**, 36, p. 1569.