

Matériaux Fibrés (Optical fibre materials)

Bernard Dussardier, Gérard Monnom

▶ **To cite this version:**

Bernard Dussardier, Gérard Monnom. Matériaux Fibrés (Optical fibre materials). G. Roosen. Filière silicium et matériaux fonctionnels pour l'optoélectronique, Lavoisier„ pp.349-387, 2003, EGEM. hal-00589255

HAL Id: hal-00589255
https://hal.science/hal-00589255

Submitted on 28 Apr 2011

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.

Chapitre 9

Matériaux fibrés

9.1. Introduction

L'évolution des recherches en optique guidée depuis la naissance de cette spécialité a toujours été intimement liée aux progrès effectués sur les matériaux. Au début, il s'est agit d'obtenir des matériaux les plus purs possibles afin d'éviter les phénomènes néfastes d'absorption et de diffusion de l'onde lumineuse dans le milieu. En 1969, l'atténuation des fibres optiques avoisinait les 1 000 dB/km, et dix ans plus tard les progrès technologiques apportés aussi bien à la purification des matériaux précurseurs qu'aux méthodes de fabrication ont permis la réalisation de fibres optiques à base de silice présentant des pertes de 0,2 dB/km, chiffre qui correspond au minimum théorique pour ce matériau. La pureté extrême des fibres étant réalisée, il est devenu possible de doper intentionnellement le matériau par des éléments actifs : cette innovation a révolutionné les techniques de télécommunication. Les nouveaux systèmes de télécommunications à longues distances sont maintenant tout optique grâce à l'utilisation de fibres pour la transmission comme pour l'amplification. Ce n'est là qu'un exemple des progrès réalisés en optique guidée grâce aux recherches sur les matériaux ; bien d'autres pourraient être cités : fibres lasers accordables en longueur d'onde, multiplexeurs en longueurs d'onde. Tirant profit de la forte densité de puissance accessible en optique guidée, des lasers émettent dans des domaines spectraux non accessibles en optique massive grâce à de nouveaux matériaux ou aux propriétés non linéaires de matériaux existants.

La première section est consacrée aux notions indispensables à la compréhension des autres chapitres : notion de guidage optique, de propagation,

---

Chapitre rédigé par Gérard MONNOM et Bernard DUSSARDIER.

causes d'absorption dans les fibres, dispersion, spectroscopie. La section suivante traite plus spécifiquement des méthodes de fabrication et de caractérisation des fibres optiques. La troisième section est consacrée aux composants basés sur des fibres à base de silice (réseaux de Bragg, coupleurs, amplificateurs, lasers et capteurs) tandis que la dernière donne un aperçu des diverses applications des fibres à base de verres de basse énergie de phonon.

9.2. Principe

La structure guidante d'une fibre optique (figure 9.1) est constituée d'un milieu d'indice nc(r) (le cœur) centré sur l'axe de la fibre (z), entouré d'un matériau d'indice plus faible ng(r) (la gaine). Le rayon de cœur *a* varie de quelques micromètres (fibres unimodales) à quelques centaines de micromètres (fibres largement multimodales). Le diamètre externe de la gaine varie de 50 μm à 1 mm selon les applications, le standard en matière de télécommunications étant de 125 μm. Un revêtement de résine acrylique, silicone ou de téflon est en général utilisé afin d'accroître la résistance (mécanique et à la corrosion) des fibres possédant une gaine en verre.

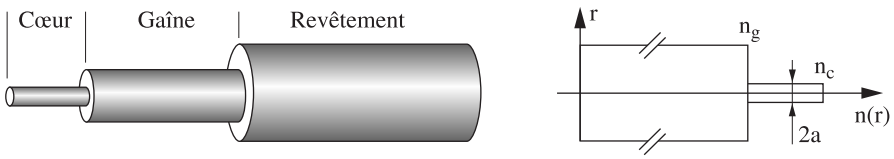


Figure 9.1. *Structure d'une fibre optique*

La fibre optique doit présenter autant que possible une symétrie de révolution autour de l'axe *z* (les fibres biréfringentes font cependant exception à cette règle). Elle est dite à saut ou à gradient d'indice selon que la distribution radiale d'indice n(r) transite brutalement ou progressivement à l'interface cœur-gaine. De manière générale, l'onde lumineuse se propage dans le cœur, seules les fibres unimodales guident une fraction importante d'énergie dans la gaine : dans ce type de fibres, la gaine proche de l'interface cœur-gaine (dite gaine optique) requiert une pureté comparable à celle du cœur.

9.2.1. *Propagation*

Le principe de la propagation de la lumière dans une fibre optique, ou de manière plus générale dans un guide d'onde, peut apparaître relativement simple à

appréhender de manière qualitative. On peut, par exemple, se représenter un guide d'onde plan comme un dispositif constitué de deux miroirs parfaits, en regard : un rayon lumineux arrivant sous incidence rasante entre ces miroirs resterait piégé, se propageant au moyen de réflexions multiples. Cette vision qualitative est inadaptée à la description exacte de la propagation dans les fibres optiques. En effet, ces structures confinent transversalement l'onde lumineuse sur quelques longueurs d'onde de telle sorte que la lumière ne peut emprunter qu'un nombre fini de configurations pour se propager : les modes propres de propagation, qui, de par la symétrie cylindrique des fibres optiques, s'expriment à partir de fonctions de Bessel [GHA 99].

9.2.2. *Atténuation*

L'atténuation traduit la perte en intensité d'une onde lumineuse lors de sa propagation et s'exprime en décibels par kilomètre est définie par :

$$\text{pertes en } \mathrm{dB.km^{-1}} = 10 \log_{10} (P_0 / P)$$

où P_0 est la puissance optique du signal incident et P la puissance du signal après qu'il ait parcouru un kilomètre dans la fibre.

On doit distinguer parmi les causes d'atténuation dans les fibres optiques celles qui sont fondamentales, c'est-à-dire inhérentes à la nature même du matériau choisi, de celles qui sont réductibles, c'est-à-dire causées par les imperfections des méthodes de fabrication.

9.2.2.1. *Atténuation intrinsèque de la silice pure*

L'atténuation intrinsèque d'une fibre supposée exempte d'impuretés et de défauts résulte principalement de trois effets : l'absorption ultraviolette, la diffusion Rayleigh, et l'absorption infrarouge.

9.2.2.1.1. Atténuation due à l'absorption ultraviolette

Le bord de la bande d'absorption ultraviolette due aux transitions électroniques dans la silice se situe en dessous de 0,2 μm, son influence est donc négligeable dans le domaine du visible. L'absorption ultraviolette des fibres optiques est principalement déterminée par leur teneur en germanium : en effet, la queue de la bande centrée sur 0,185 μm liée à des transitions électroniques dans le composé GeO_2 s'étend jusque dans la région du visible de courtes longueurs d'onde ; sa contribution à l'atténuation intrinsèque des fibres augmente avec le pourcentage molaire de GeO_2 dans la silice [MAT 71]. Précisons aussi que l'utilisation de germanium pour le dopage de fibres unimodales destinées à des expériences non

linéaires dans le domaine visible est à proscrire, car sous de fortes densités optiques, apparaissent des centres colorés qui rendent la fibre très absorbante.

9.2.2.1.2. Atténuation due à l'absorption infrarouge

L'absorption infrarouge est due aux différents modes de vibration du réseau de silice et aux vibrations des liaisons formées par les dopants. La queue des bandes dues aux harmoniques des modes de vibration fondamentaux de la silice pure s'étale jusqu'à la région de 1,6 μm, mais pas en dessous. Par contre, la présence de phosphore ou de bore provoque l'apparition de nouveaux modes de vibration dont les harmoniques affectent l'atténuation des fibres à 1,5 μm. Pour des fibres devant être utilisées dans l'infrarouge, il est donc souhaitable de minimiser leur concentration dans la silice.

9.2.2.1.3. Atténuation due à la diffusion Rayleigh

La diffusion Rayleigh est due aux fluctuations locales de la susceptibilité électrique du matériau. Dans la silice pure, ces fluctuations résultent des variations locales de densité, inhérentes à la nature des matériaux vitreux. Celles-ci diminuent avec la température de vitrification, et sont donc réduites lorsque du phosphore est incorporé à la silice en tant que fondant. Mais dans la silice dopée, les variations de compositions provoquent d'autres variations de la susceptibilité électrique. L'intensité diffusée totale suit une loi en λ^{-4}.

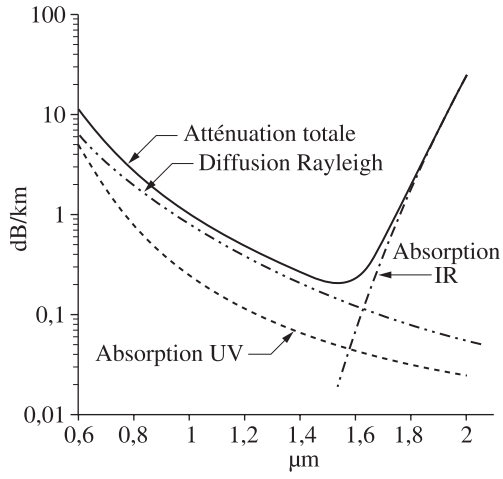


Figure 9.2. *Atténuation spectrale intrinsèque dans une fibre de silice (teneur en germanium : 8 % molaire) [UHL 84]*

La figure 9.2 [UHL 84] présente le résultat de la combinaison de ces trois facteurs pour une fibre contenant 8 % molaire de GeO_2 (ce qui correspond à une différence d'indice de 10^{-2} environ). Il apparaît une région d'atténuation minimale dans la silice comprise entre 0,7 et 1,6 μm : c'est une des raisons pour lesquelles les systèmes de télécommunications optiques, conçus initialement pour travailler à la longueur d'onde 0,8 μm à partir des diodes lasers AsGa, ont évolué vers les plus grandes longueurs d'ondes, en même temps que se sont développées de nouvelles sources dans ce domaine spectral.

9.2.2.2. *Atténuation réductible*

L'atténuation réductible est due à l'absorption par les impuretés chimiques contenues dans la silice et à la diffusion par les imperfections mécaniques et géométriques des fibres optiques. Dans le domaine spectral du visible et du proche infrarouge, les impuretés chimiques qui jouent le plus grand rôle dans l'absorption sont les métaux de transition et les radicaux hydroxyles OH^-. Les défauts de la silice (bulles, microcraquelures, zones dévitrifiées) ainsi que les défauts du guide, (mauvaise interface cœur/gaine, variations longitudinales du diamètre de cœur ou de l'indice de réfraction) provoquent des pertes par diffusion peu dépendantes de la longueur d'onde, par couplage de l'énergie lumineuse dans des modes non guidés de la fibre. L'obtention de verre sans bulles et sans zones dévitrifiées est possible par ajustement de certains paramètres de fabrication connus. Les microcraquelures peuvent aussi être évitées à condition que les coefficients de dilatation thermique des matériaux en présence à l'interface cœur/gaine ne soient pas trop différents, ce dont il faut tenir compte dans le choix des dopants.

9.2.2.2.1. Atténuation due à la présence d'ions métalliques

Les ions métalliques de transition provoquent dans la silice des niveaux d'atténuation inacceptables, même pour de très faibles concentrations, comme le montre la figure 9.3 [SCH 74].

Les ions métalliques pouvant être incorporés dans la silice proviennent essentiellement des sources de précurseurs chimiques, et sont relativement aisés à éliminer. D'une part, les sources liquides utilisées pour la fabrication des fibres optiques constituent depuis longtemps les principales matières premières de l'industrie des semi-conducteurs, et leur pureté est déjà optimale. D'autre part, les procédés de fabrication des fibres optiques utilisent des méthodes de synthèse chimique en phase vapeur, qui comportent par nature une distillation des sources liquides. Les ions métalliques se présentent sous formes de chlorures ayant des pressions de vapeurs inférieures de plusieurs ordre de grandeurs à celles des réactants utilisés [UHL 84]. Sans autres précautions, les concentrations en ions métalliques dans les fibres optiques n'excèdent pas quelques ppb.

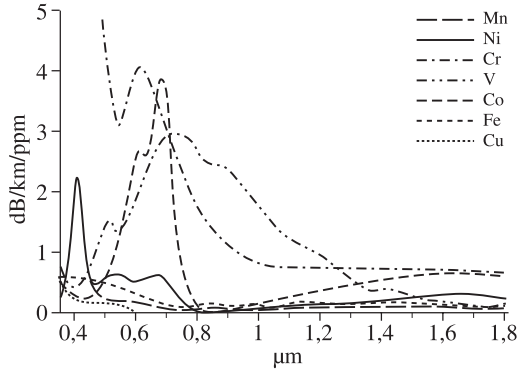


Figure 9.3. *Atténuation due à la présence de 1 ppm d'impuretés, pour un certain nombre d'ions métalliques [SCH 74]*

9.2.2.2.2. Atténuation due à la présence de radicaux hydroxyles

C'est donc l'absorption liée à la présence de radicaux hydroxyles dans la silice qui constitue la limite de l'atténuation réductible. Elle est due aux harmoniques de la vibration fondamentale de la liaison OH à 2,73 µm, et à leurs combinaisons avec des bandes de vibrations fondamentales du réseau de silice. Si la teneur de la silice en radicaux OH^- est très importante, les queues des pics situés dans l'infrarouge peuvent recouvrir des régions du proche infrarouge et du visible. L'atténuation spectrale associée à la présence d'un ppm d'ions OH^- est représentée sur la figure [BAR 78]. La réduction de la teneur en radicaux OH^- de la silice de synthèse est l'un des critères les plus contraignants auxquels doivent satisfaire les méthodes de fabrication des fibres optiques.

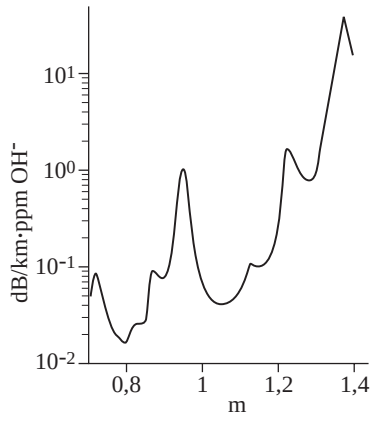


Figure 9.4. *Atténuation due à la présence de 1 ppm d'ion OH^-*

9.2.3. *Dispersion*

Dans les fibres multimodales, la dispersion intermodale constitue la cause prépondérante d'élargissement des signaux. Bien qu'elle puisse être minimisée par l'optimisation du profil d'indice, l'utilisation de fibres unimodales est le seul moyen d'éliminer cet inconvénient. Mais le problème de la dispersion chromatique, c'est-à-dire la variation de la vitesse de groupe en fonction de la longueur d'onde sur la largeur spectrale du signal se pose alors, d'autant plus que le spectre des signaux s'élargit lorsque le débit d'information augmente. Cette dispersion chromatique résulte de deux effets : la dispersion intrinsèque du matériau utilisé, et la dispersion intramodale due à l'effet du guide. En effet, la silice présente comme tout matériau une dispersion, c'est-à-dire que son indice de réfraction n varie non linéairement en fonction de la longueur d'onde λ. Toutefois, la dispersion intrinsèque de la silice s'annule pour λ = 1,2728 μm, longueur d'onde à laquelle le niveau d'atténuation fondamentale est faible et ce fait a orienté dans un premier temps le choix de la longueur d'onde utilisée en télécommunications optiques vers la valeur 1,3 μm.

La dispersion chromatique liée au guide provient de l'évolution de la constante de propagation des modes, rapportée à l'indice de réfraction, suivant les valeurs de la fréquence optique de la porteuse du signal.

La dispersion chromatique totale dans une fibre unimodale est donc la somme algébrique d'un terme de dispersion intrinsèque du matériau et d'un terme de dispersion liée à l'effet du guide. Les deux termes sont de signes opposés pour les longueurs d'ondes supérieures à 1,3 μm ; il est alors possible d'augmenter volontairement la valeur de la dispersion liée au guide (en choisissant convenablement les valeurs des paramètres optogéométriques du guide), afin de compenser la dispersion du matériau. On peut ainsi annuler la dispersion chromatique pour une longueur d'onde déterminée (supérieure à 1,3 μm), et en particulier amener la longueur d'onde de dispersion nulle à coïncider avec la longueur d'onde d'atténuation minimale dans les fibres optiques de silice, à 1,5 μm. Il est également possible de minimiser la dispersion chromatique sur toute une plage de longueurs d'ondes [COH 79], ce qui permet de réaliser le multiplexage en longueurs d'ondes des signaux véhiculés, la largeur de la bande à faible dispersion déterminant le nombre de canaux utilisables. Les profils d'indice des fibres présentant ces performances sont très élaborés. Ils demandent en particulier que l'on sache réaliser des variations d'indice abruptes, donc sur de très courtes distances radiales, c'est-à-dire que l'on maîtrise parfaitement les problèmes de diffusion des dopants dans la silice.

9.2.4. *Spectroscopie*

Les fibres optiques étant dans leur très grande majorité utilisées dans les télécommunications, où elles sont l'élément permettant de véhiculer l'information mais aussi, grâce aux amplificateurs optiques, de réamplifier le signal, ce paragraphe est destiné à apporter les notions essentielles à la compréhension de l'amplification dans les fibres dopées erbium.

Les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement se font de manière discontinue par des collisions du type atome-photon et atome-phonon. Elles se produisent à des instants aléatoires et par conséquent, les seules prévisions que l'on peut faire sont de nature statistique, exprimées par des probabilités. Le milieu atomique est alors considéré macroscopiquement.

9.2.4.1. *Absorption et émission des verres dopés terres rares*

Lorsqu'un flux lumineux traverse le milieu atomique, des collisions entre des photons et des atomes situés sur le niveau $|1>$ peuvent provoquer l'absorption d'un certain nombre de photons et l'excitation du même nombre d'atomes vers l'état excité $|2>$. Cette excitation n'a lieu que si l'énergie de chaque photon est égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux, et s'il existe des atomes sur le niveau $|1>$. Une transition d'absorption n'est pas spontanée, mais induite par la présence de photons incidents.

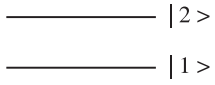


Figure 9.5. *Schéma énergétique d'un système à deux niveaux*

Une fois excité, l'atome peut se désexciter spontanément par émission d'un photon ayant une énergie égale à la différence d'énergie entre les niveaux $|2>$ et $|1>$. Un photon incident peut également provoquer la désexcitation d'un atome préalablement excité en $|2>$ vers le niveau inférieur $|1>$; l'énergie libérée donne alors naissance à un photon additionnel au rayonnement, en tout point identique au photon incident : mêmes fréquence, phase, direction de propagation et état de polarisation. Les taux de transitions induites 2 --> 1 et 1 --> 2 sont rigoureusement identiques, et proportionnels à l'intensité du rayonnement incident, ce qui les distinguent des transitions radiatives spontanées. La dynamique de l'absorption et de l'émission induite s'exprime ainsi :

$$dN_{2,ind} = (N_1 . B_{12} - N_2 . B_{21}). U_{12}.dt$$

où $\boldsymbol{N}_2$ et $\boldsymbol{N}_1$ sont les densités de population respectives des niveaux |2> et |1>, u_{12} est la densité d'énergie de la transition centrée en ν_{12}, et B_{12} est le coefficient d'Einstein pour la transition induite 1 --> 2. Dans le cœur d'une fibre optique, le produit $W_{12} = B_{12} .u_{12}$ s'exprime aussi par :

$$W_{12} = B_{12} .u_{12} = \sigma_{12} .(I_{12} / h\nu_{12})$$

σ_{12} est la section efficace au centre de la transition 1-->2, et $I_{12} = (c/n).u_{12}$ est l'intensité optique totale centrée en ν_{12}, et n l'indice du milieu.

Afin de satisfaire à la loi d'Einstein, les sections efficaces σ_{12} et σ_{21} sont égales et l'évolution de la population du niveau excité s'écrit alors :

$$d\boldsymbol{N}_{2,total} = d\boldsymbol{N}_{2,spont} + d\boldsymbol{N}_{2,ind} = (-\boldsymbol{N}_2 /\tau_2 + (\boldsymbol{N}_1 - \boldsymbol{N}_2).\sigma_{12}.I_{12}/h\nu_{12}).dt$$

9.2.4.2. *Transitions non radiatives : effet de l'énergie de phonon*

Les ions de terres rares ont la propriété de posséder au sein de leur couche 4f des niveaux métastables : ces systèmes peuvent être momentanément portés hors de l'équilibre thermodynamique. Cette propriété est couramment mise à profit pour atteindre l'inversion de population nécessaire à l'émission laser : sous l'action d'une excitation externe, la population du niveau émetteur de la transition laser devient supérieure à celle du niveau récepteur, bien que ce dernier corresponde à un état d'énergie moindre. Le temps moyen que met le système à relaxer spontanément vers un état stable lorsque l'excitation cesse, est appelé « durée de vie » et noté τ. $1/\tau$ représente la probabilité de désexcitation par unité de temps du système et se décompose en une composante radiative $1/\tau_R$ et une composante non radiative $1/\tau_{NR}$ suivant la relation :

$$1/\tau = 1/\tau_R + 1/\tau_{NR}$$

La composante radiative correspond à la possibilité qu'a le niveau supérieur à émettre un rayonnement électromagnétique : τ_R évolue d'une centaine de µs à quelques dizaines de ms suivant le niveau et la terre rare considérée. Cette valeur importante traduit le fait que les transitions dipolaires électriques sont interdites au premier ordre dans les terres rares.

La composante non radiative représente la possibilité qu'a l'ion de relaxer vers l'état énergétique immédiatement inférieur en émettant la différence d'énergie sous forme d'un nombre entier de phonons. Ce processus relève donc d'un couplage avec la matrice ; son efficacité dépend du nombre de phonons qu'il est nécessaire de créer pour dissiper l'énergie de la transition, donc de l'énergie des phonons susceptibles

de se propager dans la matrice. Il peut être approximativement décrit par la relation [REI 77] :

$$\frac{1}{\tau_{NR}} = A\ e^{-B^2E}\left(\frac{1}{1-e^{-\frac{E_{max}}{kT}}}\right)^{\frac{^2E}{E_{max}}} = A\,e^{-B_nE_{max}}\left(\frac{1}{1-e^{-\frac{E_{max}}{kT}}}\right)^n$$

avec $n = \Delta E / E_{max}$

où A et B (> 0) sont des paramètres phénoménologiques dépendant de la terre rare considérée dans une matrice donnée (mais pas des niveaux énergétiques), E_{max} représente l'énergie maximale des phonons dans cette matrice (environ 1100 cm^{-1} dans la silice), ΔE la différence d'énergie entre les niveaux émetteur et récepteur de la transition phononique, et (dans la limite $\Delta E > E_{max}$) n représente le nombre de phonons impliqués dans le processus. A température ambiante et dans la silice E_{max}/kT est de l'ordre de 5, le terme à la puissance $n^{ième}$ de la relation peut-être linéarisé pour donner :

$$\frac{1}{\tau_{NR}} = A\left(1+n\ e^{-\frac{E_{max}}{kT}}\right)e^{-B_nE_{max}}$$

Le terme de droite de cette relation traduit l'évolution en température de la probabilité d'émission phononique : la durée de vie d'un niveau décroît lorsque l'on augmente la température. Le fait d'avoir à émettre plusieurs phonons peut rendre le processus phononique plus improbable que l'émission radiative : le niveau est alors métastable.

En pratique, n = 4 est pris comme critère empirique de métastabilité d'un niveau : on constate généralement qu'un niveau est métastable dans une matrice lorsque l'écart énergétique qui le sépare du niveau immédiatement inférieur, est d'au moins quatre fois l'énergie maximale des phonons qui peuvent se propager dans la matrice, ce qui fixe la limite à environ 4 400 cm^{-1} dans la silice [IZA 77]. L'énergie des phonons dépendant de la matrice, l'émission d'un niveau peut être radiatif dans un matériau et non radiatif dans un autre.

9.2.4.3. *Transferts d'énergie*

Le transfert d'énergie non radiatif est un phénomène connu de longue date : Förster, Dexter [DEX 53, FOR 48] en posèrent les bases théoriques dans les années cinquante. Il est décrit de manière très schématique sur la figure 9.6 : un ion excité (le donneur) relaxe vers un état moins énergétique en cédant, par un processus non radiatif, son énergie à un ion voisin (l'accepteur), ce dernier se trouvant alors porté dans un état d'énergie supérieur.

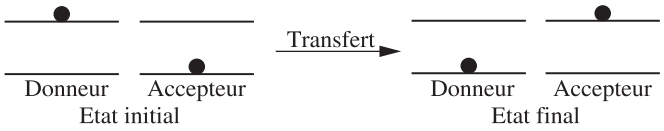


Figure 9.6. *Représentation schématique du mécanisme de transfert d'énergie*

De nombreux travaux expérimentaux ont été menés dans les années 1960-1970, visant principalement à mettre en évidence ce transfert et à quantifier son efficacité en configuration massive. Les ions trivalents de terres rares, possédant de faibles probabilités de transitions radiatives étaient des candidats idéaux pour étudier le transfert, celui-ci pouvant s'avérer plus probable que l'émission radiative.

Le récent essor de l'optique guidée a remis à l'ordre du jour le transfert d'énergie non radiatif, le fort confinement des intensités lumineuses permettant d'en augmenter l'efficacité. Nous verrons (paragraphe 9.5.3) que des lasers à fibre ont ainsi pu être réalisés par transfert d'énergie. Cet effet a également été utilisé pour étendre la plage de pompage des amplificateurs à erbium (en le codopant ytterbium) à la longueur d'onde d'émission des lasers Nd:YAG.

L'observation d'une émission visible sous excitation infrarouge, résultant d'une *up-conversion* par deux transferts successifs, a également été relatée dans des structures guidées généralement réalisées dans des matrices constituées d'éléments lourds, permettant de préserver la métastabilité des niveaux excités des terres rares, donc d'obtenir une bonne efficacité quantique .

9.3. Fabrication et caractérisation

9.3.1. *Introduction*

Avant d'examiner les méthodes de fabrication, il est important de rappeler certaines bases sur la structure des verres et explorer les matériaux les plus efficaces pour réaliser des fibres optiques vouées à des applications spécifiques. Nous parlerons ici uniquement des fibres à base de verres d'oxydes (silice ou composites d'oxydes), d'halogénure ou de chalcogénures, qui peuvent être fabriquées en des longueurs suffisantes et pour lesquelles les applications les plus importantes ont pu être démontrées. Nous insisterons plus sur la fabrication des fibres de silice, car leur importance d'un point de vue socio-économique surpasse largement celle des autres types de fibres, en particulier en télécommunications optiques. Les fibres en verres dits « mous », ou à basse énergie de phonon, ont démontré de très intéressantes performances comme sources lasers, et c'est à ce titre que nous les traitons ensuite.

Enfin, nous décrirons les techniques principales de caractérisation particulières au fibres optiques.

9.3.2. *Propriétés des verres*

9.3.2.1. *Composition et structure*

Un verre est un matériau amorphe présentant un ordre à courte distance et formant une matrice tridimensionnelle, mais sans l'uniformité, la symétrie ni la structure des cristaux, ce qui leur ôte tout ordre à grande distance. Les types de verres considérés ici sont classés suivant l'anion principal entrant dans leur composition : oxydes (O), chalcogénures (S, Se, Te) et halogénures (F, Cl, Br, I), mais certains matériaux fibrés peuvent être mixés. Les verres d'oxydes pour fibres optiques sont divisés en silice SiO_2 et en verres composites, dont les « formateurs » sont principalement Si, B, P et/ou Ge, les « modificateurs » des alcalins et alcalino-terreux, et des éléments dits « intermédiaires », tels Al, Ti, Zr... Les principales fibres en halogénures sont « formées » par ZrF_4 ou CdF_2, et celles à base de chalcogénures sont « formées » par Ga_2S_3, As_2S_3. Les compositions de ces deux types de verres peuvent être « modifiées » par un très grand nombre d'éléments, afin de stabiliser les verres contre la cristallisation, l'instabilité chimique et les contraintes mécaniques. La littérature est riche en théories et études de formation et stabilité des systèmes vitreux [ZAR 91].

Pour certaines applications (amplificateurs pour télécommunications, lasers,...), les fibres sont dopées d'ions de terre rare (TR) [KOE 64][MEA 85] ou de métaux de transition [FEL 00]. Dans la silice, la concentration en terre rare est limitée à <0,01 at %, et à < 1 % si quelques at % d'ions intermédiaires (Al, P) ont été ajoutés ([FRA 91], p. 50-78). A l'opposé, les verres fluorés tels que ZBLAN contiennent déjà quelques 4 at % de LaF_3, aisément substituables par TrF_3, et les verres GLS (Ga:La:S) contiennent jusqu'à 30 at % de La_2S_3, substituables par Tr_2S_3.

9.3.2.2. *Propriétés thermiques et mécaniques [ZAR]*

Contrairement aux cristaux, les verres se caractérisent par l'absence de point de fusion précis, remplacé par une variation de viscosité sur une plage de température plus ou moins étendue. Ceci permet la fabrication de grandes longueurs de fibre de bonne qualité. Les types de verres sont définis en pratique par les températures nécessaires à l'obtention d'un jeu prédéfini de viscosités, correspondant à des phases de travail du verre [MID 79, RAW 80]. Au sein d'une famille de verre particulière, une faible variation de composition peut parfois faire fortement varier ces températures caractéristiques. Lors du choix des verres de la fibre, leurs propriétés respectives sont d'une grande importance. En particulier, leurs coefficients de

dilatation, températures de travail et de fibrage doivent être compatibles, afin de minimiser les contraintes mécaniques ([FRA 91], p. 52).

9.3.2.3. *Propriétés optiques*

Les propriétés optiques à considérer en technologie des fibres optiques sont : absorption, réfraction, dispersion chromatique et diffusions linéaires et non linéaires. Les phénomènes d'absorption et de diffusion linéaires (Rayleigh) sont confondus en la transmission en fonction de la longueur d'onde. Celle des verres d'oxyde s'étend de l'UV (200 nm) à l'infrarouge (IR) (3-4 μm), la plus large étant celle de la silice, qui présente un minimum d'atténuation théorique de 0,15 dB/km à 1,5 μm. En pratique, elle vaut ~ 0,2 dB/km dans fibres commerciales. Pour le transport de lumière laser IR, comme le CO_2 à 5 μm ou 10,6 μm, d'autres verres, principalement chalcogénures et/ou halogénures sont employés, car leur bande d'absorption multiphononique est repoussée à 10-40 μm. Les fibres en verres de type ZBLAN à base de fluorures de Zr, Ba, La et Na, ont été initialement développées pour leur exceptionnelle transparence intrinsèque à 2,7 μm (< 0,01 dB/km). Mais ceci n'a jamais pu être expérimentalement démontré dans une fibre unimodale. Toutefois, elles présentent un bonne transmission de l'UV jusqu'à 7-8 μm.

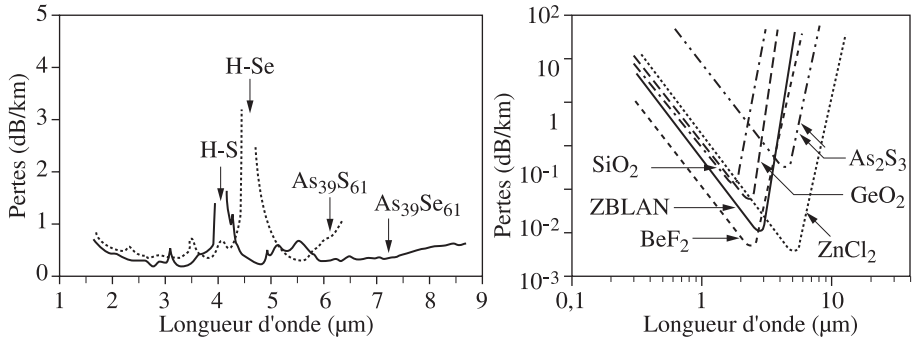


Figure 9.7. *Transmission spectrale prédite de verres fibrables*

La différence d'indice de réfraction entre cœur et gaine des fibres s'obtient par de légères modifications (quelques %) de sa composition : GeO_2 dans la silice, Ba^{2+} remplaçant Na^+ dans le ZBLAN. On peut ainsi confectionner des fibres, même unimodales, avec une grande précision. Les verres chalcogénures ou chalco-halogénures possèdent un indice de réfraction très fort (2 à 3) alors que les verres fluorés et la silice ont un indice plus faible (~1,444 à 1,5 μm pour SiO_2). La dispersion chromatique et l'indice non linéaire n_2 sont liés à l'indice de réfraction : même faibles dans la silice, ces phénomènes sont de première importance pour les

télécommunications à grande distance et hauts débits. Par contre, il peut être mis en œuvre dans des applications non linéaires en utilisant des matériaux à très fort indice (chalcogénures).

9.3.3. *Fabrication de fibres en silice*

9.3.3.1. *Préformes*

La fabrication de préformes en silice débuta au début des années 1970. Ces techniques ont rapidement montré des performances bien supérieures à celles alors courantes, produisant des fibres compatibles avec les télécommunications optiques à longue distance et hauts débits. Elles sont basées sur l'oxydation de $SiCl_4$ formant des particules submicroniques de silice (SiO_2) amorphe qui sont déposées en couches. Celles-ci sont ensuite consolidées et densifiées en silice vitreuse. D'autres chlorures, tels $GeCl_4$, $POCl_3$, ainsi que des sources de fluor, codopent la silice pour ajuster son indice de réfraction.

9.3.3.1.1. Méthodes « externes » : OVD, VAD

Les techniques de dépôt « externes » utilisent l'hydrolyse des réactifs lorsqu'ils traversent la flamme d'un chalumeau en translation dans l'axe de la future préforme. Dans le cas de l'OVD (*Outside Vapour Deposition*), les suies formées se consolident partiellement lorsqu'elles sont collectées sur un mandrin en rotation. Les couches de cœur sont déposées en premier, suivies de la gaine. La préforme poreuse obtenue, très humide du fait de l'hydrolyse, est ôtée du mandrin, puis séchée, puis densifiée à chaud (1 400-1 600 °C) dans une atmosphère réactive ($He\text{-}Cl_2\text{-}O_2$). Le trou central est rétreint soit pendant la densification, soit pendant le fibrage.

Le procédé VAD (*Vertical Axial Deposition*) forme aussi une préforme poreuse, mais le dépôt se fait simultanément latéralement, pour la gaine, et axialement, pour le cœur, en utilisant deux chalumeaux. La préforme ne présente pas de trou central, et elle est ensuite densifiée comme en OVD. La différence fondamentale entre OVD et VAD est que le profil d'indice en OVD est obtenu en changeant la composition de chaque couche, alors que celui obtenu en VAD dépend du contrôle subtil des constituants de la flamme, et de la forme et distribution de température à la surface de l'extrémité de la préforme. La mise au point de chalumeaux pour VAD, très délicate, permet un très bon contrôle du profil d'indice.

9.3.3.1.2. Méthode « interne » : MCVD

La technique de dépôt « interne » oxyde les réactifs à chaud à l'intérieur d'un tube substrat en silice, en rotation sur un tour de verrier. Les réactifs de très grande pureté sont mélangés à de l'oxygène et injectés dans le tube. Le procédé le plus courant est MCVD (*Modified Chemical Vapour Deposition*) : une réaction

homogène en phase vapeur, dans la zone chaude créée par un chalumeau en translation le long du tube, produit des particules de SiO_2 qui se déposent sur la paroi du tube, en aval, et qui sont densifiées lorsque le chalumeau passe sous le dépôt. La température du chalumeau est suffisante pour la réaction et la densification (> 1 300 °C), mais pas trop élevée, pour ne pas endommager le tube. Typiquement, 30 à 100 couches sont nécessaires, avec des compositions variables pour produire un profil d'indice. Les dernières couches constituent le cœur. Cette méthode n'introduit pas d'ions OH^- du fait d'une importante pression partielle de Cl_2 dans le tube, et ne nécessite donc pas de déshydratation, comme en OVD et VAD. Le tube est ensuite rétreint en une préforme, par passes successives à > 1 600 °C. Lors de cette phase, des ions OH^- peuvent être introduits, par diffusion depuis le tube substrat ou par les gaz introduits. L'apport de Cl_2 jusqu'à la dernière passe, dite de « fermeture », diminue fortement leur concentration.

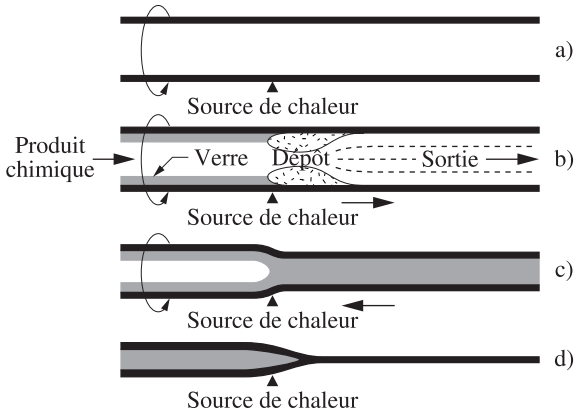


Figure 9.8. *Procédé MCVD[ZAR 91]*

9.3.3.1.3. Manchonnage (*over-cladding*)

Le manchonnage sert à augmenter le rendement fibrable par préforme : après la fabrication d'une préforme au cœur surdimensionné, son diamètre extérieur est augmenté, soit par rétreint d'un tube sur la préforme, soit par dépôt de silice par OVD. Par ailleurs, le manchonnage par rétreint a permis de développer des fibres à double cœur concentriques, pour lasers et amplificateurs de puissance : la préforme unimodale initiale est manchonnée par un tube de silice dont la partie interne est dopée au fluor, d'indice de réfraction plus bas que celui de la silice. Le corps de la préforme initiale, entourée de silice fluorée, constitue le large cœur multimodal guidant la lumière de pompe de ces systèmes (voir section 9.2).

9.3.3.1.4. Fibres biréfringentes

Les fibres à maintien de polarisation utilisent la biréfringence introduite par des contraintes mécaniques selon un axe transverse, causées par des zones de la gaine situées de part et d'autre du cœur et possédant un grand coefficient de dilatation. Les fibres « panda » sont réalisées en perçant des trous cylindriques dans une préforme de part et d'autre du cœur, puis en y insérant deux barreaux de silice dopée au B_2O_3 avant fibrage. Les fibres *bow-tie* (nœud papillon) sont entièrement réalisées par MCVD, par dépôt de couches de silice dopée B_2O_3 dans la gaine, sous forme de deux bandes, diamétralement opposées dans le tube substrat. Après dépôt du cœur et rétreint, les zones dopées prennent la forme d'ailes de papillon.

9.3.3.2. *Dopage des préformes par ions actifs, en phase liquide (trempage)*

Le dopage de préformes par des ions optiquement actifs peut se faire par diverses méthodes, phase vapeur, aérosol et trempage ([FRA 91], p. 58-67). Seule la dernière est décrite ici. Souple et facile à mettre en œuvre, elle est employée aussi bien en cours de fabrication par MCVD ou OVD/VAD. Ce principe a été appliqué à une préforme la première fois au début des années 1960 [KOE 64, SNI 61] mais n'a été réemployée en MCVD qu'en 1987 [TOW 87]. En MCVD, la couche de cœur est déposées à plus faible température, en un dépôt poreux. Elle est ensuite imbibée d'une solution acqueuse ou alcoolique d'ions de terre rare, et parfois d'aluminium. Après 1-2 heures, la solution est séchée à chaud (600-800 C°) pour ôter le solvant et les ions OH^-, puis consolidée, et la préforme rétreinte. En VAD et OVD, on fabrique d'abord le cœur poreux. Il est ensuite plongé dans la solution. Après trempage et séchage, il est consolidé puis recouvert de silice par OVD. Cette méthode est plus lourde qu'en MCVD, car il faut porter une attention particulière aux impuretés de l'atmosphère contenant la préforme en cours de fabrication.

9.3.3.3. *Fibrage*

Le fibrage transforme la préforme en fibre optique par étirage à chaud. On l'installe verticalement dans un mandrin en translation verticale afin de la faire passer à vitesse réduite dans un four à induction HF. La zone chaude du four porte une longueur de préforme d'environ 2 cm à 1 700-1 900 °C ; la transformation de la préforme en fibre s'effectue dans cette zone. La fibre est tirée continûment vers le bas à l'aide d'un cabestan dont la vitesse est régulée (de 1 à 30 m/s) afin d'obtenir un diamètre de fibre constant (standard : 125 µm ±0,25 à ±1 µm), mesuré en aval du four. Le profil d'indice de la préforme est conservé dans le fibre. La fibre est enduite d'une ou deux couches de résine polyuréthane polymérisée dans un four à insolation d'UV. Le diamètre final de la fibre enrobée excède généralement 250 µm. Après le cabestan, la fibre est enroulée sur une bobine. Après le fibrage, le rebobinage est une étape importante, afin d'éviter les pertes dues à une tension mécanique excessive et des macrocourbures dues au croisement des fibres sur la première bobine.

Les fibres dopées terre-rare destinées aux lasers de forte puissance (pompées optiquement par la gaine, mentionnées plus haut) sont aussi obtenues en fibrant une préforme pour fibre dopée unimodale, souvent usinée en une section rectangulaire, avec enrobage de résine silicone. L'indice de réfraction du silicone est plus faible que celui de la silice (ON ~ 0,4) et permet le guidage de la lumière de pompe du laser.

9.3.3.4. *Fibres à bande interdite photonique (BIP), « à trous »*

Depuis quelques années, un nouveau type de structure fibrée guidant la lumière suscite un grand engouement. Il s'agit de fibres formées par étirage d'empilements subtils de capillaires de silice [BIR 95]. Pendant le fibrage, les tubes se soudent entre eux, et il ne reste que les trous intérieurs. Les propriétés de propagation de la lumière sont extrêmement sensibles à l'arrangement des tubes, aux diamètres des trous, à l'espacement entre eux, à la présence ou non de silice (ou d'air) au centre de la fibre (le cœur). Un autre type de fibre BIP, dite à une dimension (1D), réalisée entièrement par MCVD a été démontrée expérimentalement [BRE 00].

9.3.4. *Fibres en verres composites d'oxydes ou non-oxydes*

Les techniques de fabrication décrites ci-dessus sont exclusivement dédiées à la silice. Pour les autres verres composites, les trois techniques mentionnées ici sont compatibles avec les propriétés thermiques, mécaniques et chimiques des verres employés. Elles furent développées avant celles en phase vapeur, mais sont encore l'objet d'améliorations. Nous ne traitons pas ici de la préparation de blocs de verres massifs (voir par exemple [ZAR] p. 1-90), mais seulement des techniques spécifiques aux fibres optiques.

9.3.4.1. Rod-in-tube

Dans deux blocs de verres convenablement choisis sont respectivement usinés un barreau (le cœur) et un tube (la gaine). Insérés l'un dans l'autre, il sont étirés en fibre en une ou plusieurs étapes, conventionnellement. Ces fibres sont en général multimodales, mais des perfectionnements permettent de produire des structures complexes, et/ou unimodales.

9.3.4.2. *Double creuset*

Le cœur et la gaine sont préparés comme ci-dessus, puis introduits dans un système de moulage continu, formé de deux creusets coniques, concentriques. Un petit flux de verre fondu du cœur s'écoule du creuset interne, traverse le bas du creuset externe et est ainsi entouré d'une couche de verre de gaine fondu. L'ensemble sort du second creuset et refroidit en une fibre. On peut contrôler le temps de contact entre les verres en fusion et leurs température pour obtenir un gradient d'indice. Un plus grand nombre de creusets concentriques peut être employé.

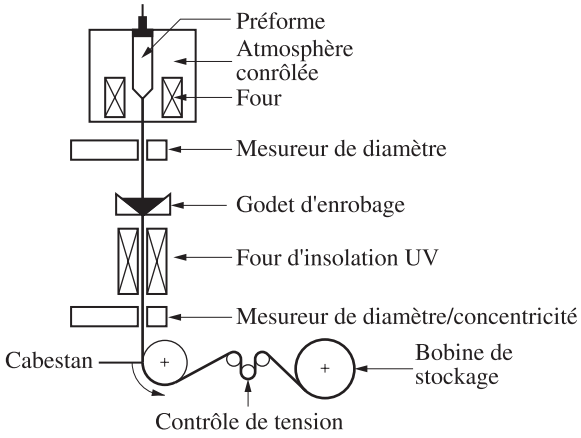


Figure 9.9. *Schéma de principe d'une tour de fibrage*

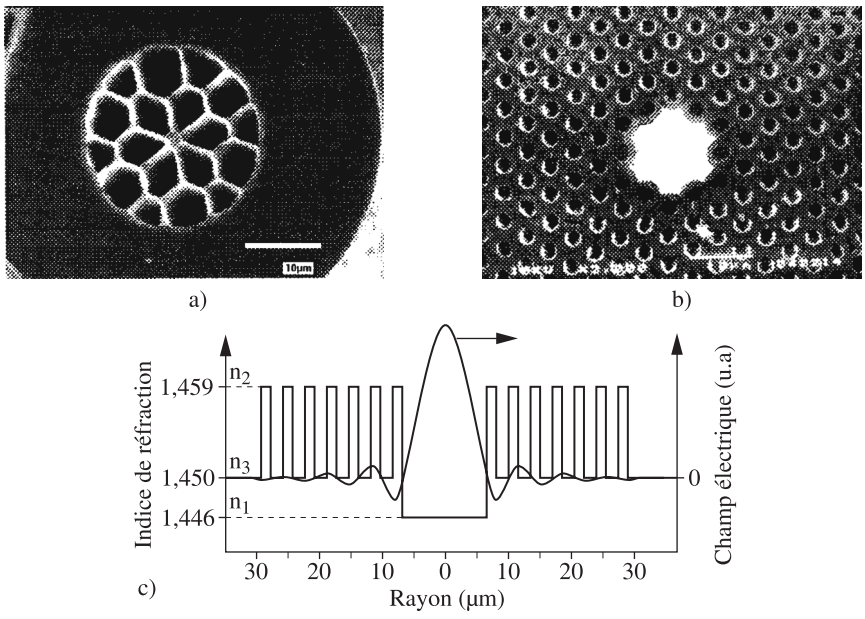


Figure 9.10. *a) Fibre à trous, guidage par le cœur d'indice plus élevé que l'indice moyen de la gaine. b) Fibre BIP, guidage dans une zone d'indice bas (air). c) Fibre BIP-1D, réalisée par MCVD*

L'inconvénient principal de ces deux techniques est l'introduction d'impuretés à l'interface cœur-gaine ou dans le volume du verre (métaux de transition venant des creusets). Ces techniques, incompatibles avec les télécommunications, restent confinées à l'élaboration de fibres de courte longueur pour lasers, amplificateurs ou capteurs.

9.3.4.3. Spin casting

Cette technique est plus particulièrement dédiée aux verres fluorés, comme le ZBLAN. Le verre de gaine, en fusion, est coulé dans un moule métallique (laiton). Celui-ci n'est rempli qu'à moitié, puis couché à l'horizontale et mis en rotation (~ 5 000 tours/min). Ainsi, le verre fondu se répartit uniformément sur la paroi avant de se solidifier en un tube de très bon état de surface et homogénéité. Ensuite, le verre de cœur est coulé dans ce tube pour terminer la préforme, toujours multimodale. Celle-ci est extraite du moule, et la surface externe, contaminée par le moule, est décapée mécaniquement ou chimiquement avant fibrage. Les fibres unimodales sont obtenues en étirant les préformes, puis en les entourant d'un tube de gaine secondaire par la technique du *rod-in-tube*.

9.3.4.4. *Fibrage : précautions particulières*

La technique de fibrage de ces fibres dérive de celle utilisée pour la silice. Lors du fibrage, les verres composites non-oxyde sont particulièrement sensibles à la cristallisation lorsque la préforme est chauffée. Pour minimiser cet effet catastrophique pour la transparence et la solidité des fibres, le four d'étirage est isolé de l'air ambiant et purgé d'un gaz sec. Il est conçu pour chauffer la préforme, puis refroidir la fibre le plus rapidement possible. La cristallisation peut être minimisée en fibrant à une température plus faible (donc à viscosité plus élevée) et en appliquant une forte tension mécanique à la fibre. Cette dernière technique est aussi employée pour étirer les préformes multimodales en cannes, typiquement de 10 à 1 mm. Celles-ci sont utilisée selon la technique du *rod-in-tube* pour former des fibres unimodales.

9.3.5. *Méthodes de caractérisation des propriétés optiques*

La mise au point et le développement de fibres optiques nécessitent la mesure de nombreuses propriétés. Nous traitons ici uniquement celles liées à leurs propriétés optiques, ou qui furent adaptées du fait de la grande longueur d'interaction offerte par les fibres optiques [OKO 82]. Les méthodes de caractérisation des matériaux eux-mêmes ne sont pas traitées ici : propriétés mécaniques (contraintes, rupture, courbure) et chimiques (composition, structure, stabilité, résistance à l'humidité, aux rayonnements ionisants). En effet, elles ne sont pas particulières aux fibres optiques,

et sont largement décrites dans la littérature consacrée aux verres en général [HEN 89, ZAR 91].

9.3.5.1. *Profil d'indice de réfraction*

Il peut être mesuré non destructivement dans la préforme, avant fibrage, ou directement dans la fibre. Dans la préforme, on mesure la déflection d'un rayon lumineux en fonction de son déplacement transversal par rapport à la préforme. Le profil d'indice est obtenu par intégration de la courbe de réflexion. La résolution spatiale typique est 5 μm (pour un cœur de 200 à 2 000 μm de diamètre), et celle pour l'écart d'indice (Δn) est égale à 5.10^{-4}. Dans la fibre, la technique la plus universelle consiste à coupler un faisceau laser fortement convergent dans la fibre. On mesure soit le profil du mode sortant à l'autre extrémité, soit on mesure la puissance non couplée dans le cœur (c'est-à-dire fuyant dans la gaine) en fonction de la position du point focal en entrée (mesure bidimensionnelle). Résolution spatiale : 0,5 πm, résolution Δn : 5.10^{-4}.

9.3.5.2. *Ouverture numérique*

On mesure l'ouverture numérique (ON) d'une fibre optique en imageant, en champ lointain (distance D), la distribution d'intensité lumineuse sortant du cœur. Dans le cas des fibres très multimodales (V > qq × 10), la distribution est un disque tavelé bien défini, de rayon R. L'ON se déduit géométriquement par :

$$ON = \sin(\tan^{-1}(R/D))$$

Dans le cas des fibres unimodales (et aussi faiblement multimodales), chaque mode a une ouverture numérique propre, dépendant de la longueur d'onde. La distribution d'intensité du mode fondamental LP_{01} peut être approximée avec une gaussienne :

$$I \alpha \exp(-2(r/\omega)^2)$$

où r est la distance transverse depuis le centre du cœur, et ω le rayon du mode. En employant une caméra CCD, cette formule peut être ajustée à la distribution d'intensité, et ω peut être déduit. L'ON est alors analogue à la divergence d'un faisceau laser gaussien de rayon de col (*waist*) en champ ω :

$$ON = \lambda/\pi\omega$$

9.3.5.3. *Transmission*

Deux méthodes principales sont utilisées pour mesurer les pertes liées à la transmission, mais aussi parfois le gain (dans un ou plusieurs amplificateurs à fibre

optique en ligne, par exemple). La première, destructive, convient aux mesures sur de courtes longueurs (fibres dopées d'ions actifs). La seconde, non destructive, est employée systématiquement dans les systèmes de liaison à grandes distances, et dans certains capteurs déportés, distribués ou ponctuels.

9.3.5.3.1. Méthode de la fibre coupée (*cut-back method*)

Dans une fibre de longueur L_1, on couple un faisceau de lumière monochromatique, de longueur d'onde variable (figure 9.11). On enregistre un spectre de transmission $P_1(\lambda)$ en sortie, entaché de la réponse spectrale du système. Sans modifier le couplage d'entrée, la fibre est clivée (longueur $L_2 < L_1$), puis la nouvelle transmission $P_2(\lambda)$ est mesurée. Le coefficient d'absorption α de la fibre coupée, de longueur L_1-L_2, est alors calculé (en dB par unité de longueur) :

$$\alpha = 10/(L_1 - L_2)*\mathrm{Log}_{10}[P_2(\lambda)/P_1(\lambda)]$$

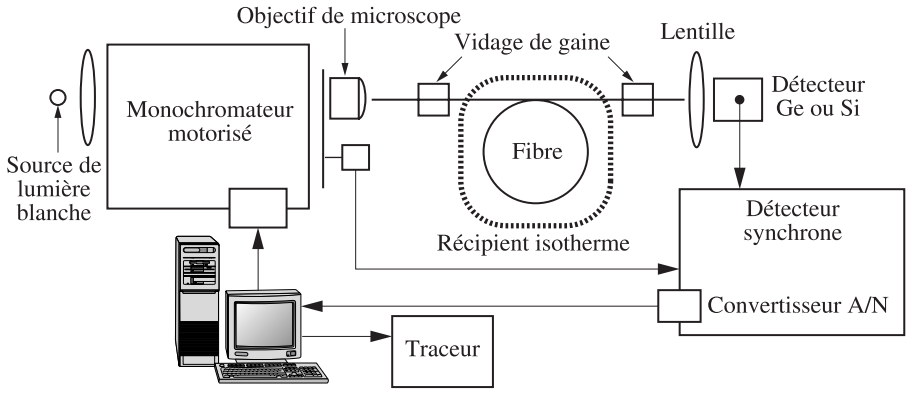


Figure 9.11. *Banc de mesure d'atténutation, par la méthode de la fibre coupée*

9.3.5.3.2. Réflectométrie résolue dans le temps (*Optical Time Domain Reflectometry*, *OTDR*)

Cette méthode utilise la lumière d'un impulsion laser courte, à une longueur d'onde choisie, et réfléchie par les différents milieux ou éléments traversés. En ligne, la diffusion Rayleigh rétrodiffusée, proportionnelle à l'intensité de l'impulsion, est détectée au point d'injection de l'impulsion. Une perte en ligne α(en m^{-1}) donne une signal proportionnel à $\exp(-2\alpha(Z).Z)$, où Z est la distance entre la source laser et le point mesuré. Les pertes ponctuelles (fibre cassée, pertes par courbure, par soudure, ou liées au transducteur d'un capteur déporté) provoquent des

variations abruptes du signal OTDR, permettant de quantifier les pertes ou le gain. La résolution est liée à la longueur de l'impulsion initiale, typiquement 10 ps à 10 ns, c'est-à-dire de l'ordre de 1 mm à 1 m.

9.3.5.4. *Longueur d'onde de coupure*

La longueur d'onde de coupure de premier mode excité, LP_{11}, correspondant à $V_C = 2{,}405$, est un paramètre très important. La mesure, dérivée de la technique de la fibre coupée, met en œuvre la sensibilité supérieure des pertes du mode LP_{11} à une courbure de la fibre (figure 9.12). Sans changer la couplage, ni la longueur de la fibre (standard = 2 m), deux spectres de transmission sont mesurés : le premier avec la fibre « droite » et libre (rayon de courbure R > 20 cm), la seconde avec la fibre courbée (plusieurs tours, R ~ qq cm). Le coefficient de pertes résultant à la forme d'une cloche, d'environ 100 nm de large en longueur d'onde, sur un fond continu. Par convention, la longueur d'onde de coupure est celle pour laquelle la perte dépasse de 0,1 dB celle du fond continu, du côté des grandes longueurs d'onde de la cloche. Cette méthode est généralisable pour les longueur d'onde de coupure des modes d'ordre plus élevé.

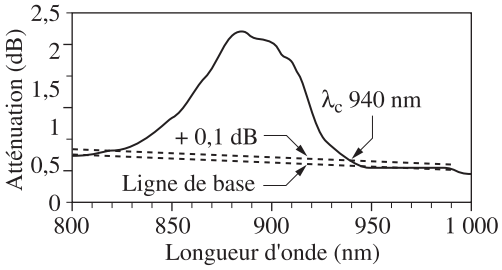


Figure 9.12. *Exemple de mesure de longueur d'onde de coupure du mode LP_{11}*

9.3.5.5. *Dispersion et effets non linéaires*

Pour les systèmes de télécommunication, la caractérisation des propriétés de dispersion (chromatique, de vitesse de groupe (GVD), modale de polarisation (PMD)) des fibres est devenue de plus en plus cruciale, du fait de l'augmentation des débits d'information et des distances parcourues. La dispersion s'obtient en mesurant la phase en fonction de la longueur d'onde introduite par une longueur de fibre connue dans la transmission d'une impulsion lumineuse. Une résolution inférieure à 0,1 ps/km/nm est suffisante pour la dispersion chromatique, mais la mesure de la PMD, liée à la faible biréfringence résiduelle des fibres, et de la GVD,

liée à des phénomènes non linéaires faibles, nécessite des résolution inférieures à 0,005 ps/km/nm.

9.4. Composants fibrés

9.4.1. *Réseaux photo-inscrits*

9.4.1.1. *Principe*

Lorsqu'une fibre dopée germanium est irradiée par un faisceau ultraviolet, on observe un changement permanent d'indice du réfraction de la zone dopée pouvant atteindre quelques 10^{-3} : ce phénomène est appelé photosensibilité. En faisant interférer deux faisceau UV on réalise ainsi un réseau d'indice : dans la région où les interférences sont constructives, l'indice est augmenté alors qu'il reste inchangé dans la partie de la fibre où les interférences sont destructives ; la période de cette modulation de l'indice de réfraction est égale à l'interfrange des interférences. Lorsque la condition de Bragg est satisfaite, c'est-à-dire quand la différence entre les constantes de propagation des modes co-(β_g) et contra-propagatifs ($-\beta_g$) est égale à la fréquence spatiale du réseau (Λ), ont observe une résonance qui conduit à une réflexion de la lumière sur le réseau :

$$\beta_g - (-\beta_g) = K = 2\pi/\Lambda$$

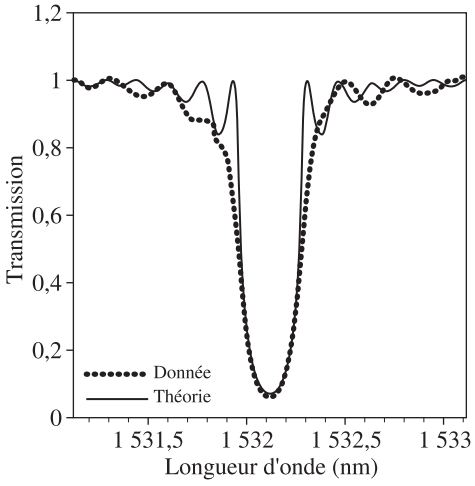


Figure 9.13. *Spectre de transmission d'un réseau de Bragg à fibre [DON 96]*

Si n_{eff} est l'indice effectif du mode, cette condition se réécrit sous la forme :

$$\lambda_B = 2\Lambda neff$$

où λ_B est la longueur d'onde de Bragg, c'est-à-dire la longueur d'onde pour laquelle la réflexion a lieu.

Les applications de ces fibres à réseaux photo-inscrits sont nombreuses : miroirs pour fibres lasers [KAS 90], composants pour multiplexage en longueur d'onde [JUM 96], filtres passe bande étroit [MOR 94], compensateurs de dispersion, en faisant varier longitudinalement le pas du réseau [OUE 87], égaliseur de gain [BER 96], capteurs de température et de contrainte [PAT 96].

9.4.1.2 *Fabrication*

Il existe plusieurs manières pour photo-inscrire des réseaux de Bragg dans les fibres, toutes basées sur l'interférence de deux faisceaux lasers UV, laser eximer ou laser à argon ionisé doublé.

La méthode la plus simple consiste à diviser en deux un faisceau laser et à les faire interférer à l'aide de deux miroirs dans une zone où la fibre est placée [MEL 89]. L'angle entre les deux faisceaux décide de la période des franges et donc du pas du réseau.

Une méthode plus précise d'inscription utilise des masques de phase. Ces masques sont réalisés en exposant une plaquette de silice à un faisceau d'électrons, puis en attaquant chimiquement la surface afin d'obtenir en surface une gravure ayant la période désirée. Lorsque le faisceau laser UV arrive sur cette surface, il diffracte et l'on fait interférer les ordres 1 et –1 dans une région où se situe la fibre.

Plusieurs méthodes ont été étudiées pour accroître la photosensibilité des fibres à base de silice et donc d'obtenir de modulation d'indice plus importants. La méthode la plus répandue est l'hydrogénation [LEM 93] : la fibre est placée dans une enceinte chauffée (70 °C) sous haute pression d'hydrogène (700 atmosphères). La photosensibilité a également été démontrée dans des fibres dopées phosphore ayant subit une deutération [STR 96].

9.4.2. *Coupleurs*

9.4.2.1. *Principe*

Le principe de ce composant est basé sur le fait que le champs d'un mode guidé s'étend relativement loin de l'interface cœur-gaine et que si l'on rapproche

suffisamment les cœurs de deux fibres optiques, le recouvrement des champs de chaque fibre va devenir important couplant ainsi les modes des deux cœurs. La puissance lumineuse injectée dans un bras du coupleur va donc se retrouver périodiquement dans une fibre ou dans l'autre, et si les constantes de propagation des deux fibres sont identiques, le transfert est total.

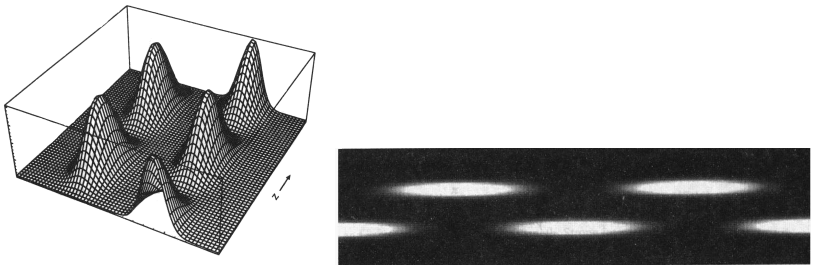


Figure 9.14. *Variation de la puissance dans les deux bras du coupleur en fonction de la distance*

9.4.2.2. *Fabrication*

Il existe deux méthodes pour réaliser les coupleurs à fibres : le polissage et la fusion-étirage.

La première consiste à réaliser le polissage mécanique d'une fibre collée dans une rainure réalisée dans un bloc de silice afin de rapprocher le cœur de la fibre de la surface. Deux fibres ainsi polies sur une longueur donnée, sont accolées ensemble et la distance entre les deux cœurs est ajustée en déplaçant un bloc par rapport à l'autre.

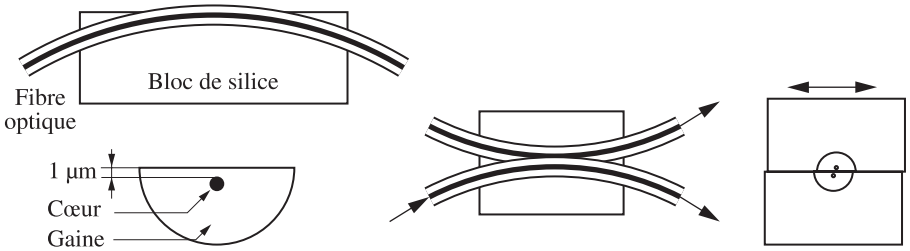


Figure 9.15. *(a) Réalisation d'un bras du coupleur. (b) Réalisation du coupleur directionnel et ajustement de la distance intercœur*

La seconde méthode de fabrication des coupleurs est beaucoup plus simple techniquement. Les deux fibres, dont le revêtement protecteur a été préalablement retiré, sont mises en contact, puis les fibres sont chauffées et étirées afin de rapprocher les deux cœurs.

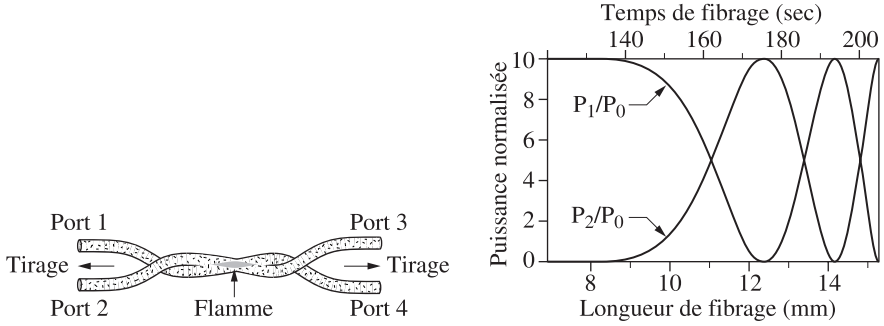


Figure 9.16. *Variation de la puissance lumineuse dans chaque bras du coupleur en fonction du temps d'étirage et de la longueur étirée*

9.4.3. *Amplificateurs et lasers*

9.4.3.1. *Amplificateurs optiques*

Les débit des réseaux de télécommunications sont limités par l'atténuation et la dispersion. Pour combattre l'effet de l'atténuation les pulses étaient jusqu'à une dizaine d'années réamplifiés électroniquement : le signal optique issu d'un tronçon du réseau est détecté par une photodiode qui le convertit en signal électrique. Ce signal est alors réamplifié et pilote une diode laser, générant ainsi un signal optique amplifié qui est recouplé au tronçon suivant du réseau. Les amplificateurs électroniques étant limités à des débits de l'ordre du Gbit/s, l'invention de l'amplificateur à fibre dopé erbium (AFDE) a permis en 1987 de lever cet obstacle. A l'heure actuelle, les AFDE trouvent des applications en tant que :

– amplificateurs de puissance afin d'amplifier le signal issu de la diode laser semi-conducteur avant de coupler le signal dans la fibre de ligne ;

– préamplificateurs afin d'améliorer la sensibilité du signal avant la détection en fin de ligne ;

– amplificateurs de ligne afin de rehausser le niveau du signal périodiquement le long de la transmission.

La figure montre le schéma énergétique de l'ion erbium où ne sont représentés que les niveaux entrant en jeu dans le processus d'amplification.

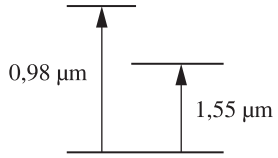


Figure 9.17. *Diagramme énergétique simplifié de l'ion erbium*

En excitant une fibre optique dopée erbium par un faisceau issu d'une diode laser émettant à 980 nm, les électrons de l'état fondamental de cet ion sont promus dans l'état excité résonant. Cet état ayant dans les fibres à base de silice une durée de vie très courte (quelques µs), ces électrons relaxent vers l'état énergétique immédiatement inférieur dont la durée de vie est d'une dizaine de milliseconde. De cette manière, suivant le taux de pompage auquel est soumis la fibre l'inversion de population et donc le gain, pourra être plus ou moins important. Dans le cas de l'erbium les équations d'évolution des populations (9.2.4.1) permettent d'obtenir l'évolution longitudinale des intensités des faisceau excitateurs et signal [GHA 99] :

$$\frac{dI_p}{dz} = -\sigma_p N_1(r,z) I_p(r,z)$$
$$\frac{dI_S}{dz} = \sigma_S[\eta_S N_2(r,z) - N_1(v)] I_s(r,z)$$

où I_p et I_s représentent respectivement les intensités des signaux excitateur et signal, σ_p et σ_s, les sections efficaces l'absorption de l'erbium aux longueurs d'onde d'excitation et du signal, $\eta_s = 1{,}73$ pour l'erbium.

Le gain local est le terme de proportionnalité entre $\frac{dI_S}{dz}$ et I_s ; le gain total de la fibre dopée est le résultat de l'intégration de ce gain local sur la longueur de la fibre. A faible puissance de pompe, le taux de pompage n'est pas suffisant pour créer une inversion de population et la fibre reste absorbante (gain < 0). A partir d'une certaine puissance couplée, la population du niveau supérieur est égale à celle du niveau fondamental rendant ainsi la fibre transparente, et à puissance plus forte l'inversion augmente rendant ainsi le gain positif. La figure 9.18 montre cette évolution avec un faible signal à amplifier.

Si l'on augmente la puissance de signal à amplifier à l'entrée de la fibre, le taux de désexcitation induite croît, baissant ainsi la population du niveau métastable au profit de celle du niveau fondamental. De ce fait, l'inversion de population décroît, entraînant une chute du gain de l'amplificateur (figure 9.19).

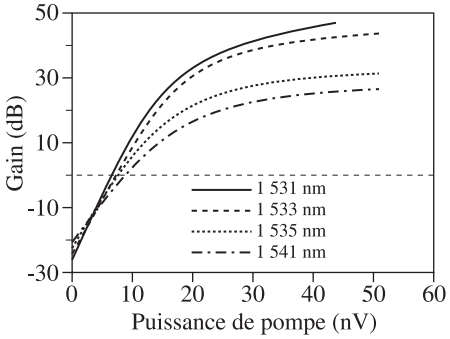


Figure 9.18. *Evolution du gain d'une fibre amplificatrice dopée erbium en fonction de la puissance couplée, pour différentes longueurs d'onde de signal*

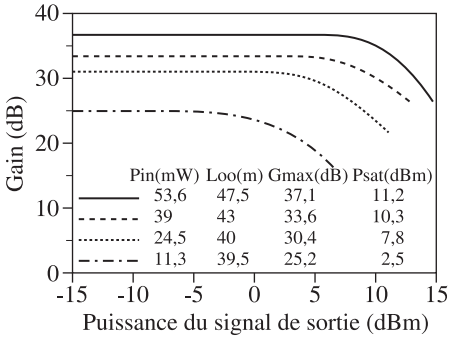


Figure 9.19. *Variation du gain d'un amplificateur à fibre dopée erbium en fonction de la puissance de signal en sortie, pour différentes puissance de pompage*

9.4.3.2. *Lasers à fibre*

Un laser à fibre est constitué d'une fibre amplificatrice placée dans une cavité résonante. Le gain obtenu dans les fibres dopées erbium est tel que les lasers à fibre ont été réalisés avant les amplificateurs : les réflexions de Fresnel aux extrémités de fibre étaient suffisantes pour créer une cavité. Les premiers lasers continus étaient basés sur des fibres dopées néodyme (0,94 et 1,06 μm) [MEA 85], erbium (1,55 μm) [REE 87] et ytterbium (0,98 et 1,04 μm) [HAN 90] en vu de leurs applications potentielles dans les domaines des télécommunications et de la métrologie. Des lasers déclenchés [BAR 93] pour des applications de puissance ont été étudiés ainsi que des lasers à modes bloqués [PHI 93] pour des applications en spectroscopie résolue dans le temps. Actuellement, les efforts sur les lasers à fibres

portent sur le pompage par la gaine et sur des structures géométriques de gaine brisant la symétrie de révolution (figure 9.20).

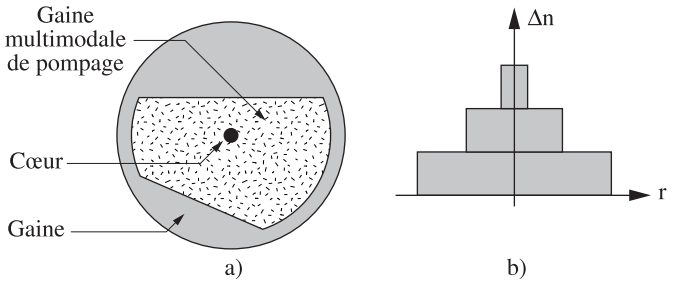


Figure 9.20. *Fibres pompées par la gaine. (a) Coupe géométrique d'une fibre ; (b) Profil d'indice suivant un diamètre non tronqué*

De telles fibres sont utilisées comme lasers de puissance car le diamètre de la zone de pompage permet de coupler des puissances très importantes et la géométrie non circulaire permet une meilleure efficacité [NIL 00].

9.4.4. *Capteurs*

Bien que la majorité des applications des fibres optiques soit orientée vers les télécommunications, elles commencent à se développer également vers celui des capteurs, que ce soit pour mesurer des grandeurs physiques (position, température, champs magnétique, courant, rotation, accélération) ou chimiques (concentration, détection de polluants) [GRA 95]. Dans tous les cas, le faisceau qui traverse le capteur est transformé ou modulé par le paramètre que l'on désire mesuré.

9.4.4.1. *Capteurs de température*

De nombreux type de capteurs de température existent aujourd'hui, tous ayant des avantages et des inconvénients. Dans les capteurs par pyrométrie déportée, la fibre optique ne sert qu'à véhiculer un signal provenant du rayonnement thermique de la cible. Cette méthode est sans équivalent pour des mesures de température très élevée. Les capteurs basés sur la variation avec la température des bandes d'absorption de dopants [SNI 83], s'ils sont de faible coût et permettent d'effectuer des mesures réparties nécessitent une très bonne stabilité en longueur d'onde et en puissance des sources. D'autres types de capteurs sont basés sur la fluorescence de dopants spécifiques introduits dans le cœur des fibres, tels les terres rares : la durée de vie de la fluorescence décroît avec une augmentation de la température [SUN 89],

le spectre et l'intensité globale de la fluorescence varient avec la température, certains niveaux énergétiques des terres rares sont couplés thermiquement et leurs propriétés d'émission sont fortement sensibles à une variation locale de température [BER 90, MAU 95]. Enfin, certains capteurs sont basés sur les réflectométries Raman et Rayleigh en tirant profit de la variation d'intensité du signal rétrodiffusé avec la température.

9.4.4.2. *Capteurs de courant*

Le caractère diélectrique de la silice permettent aux fibres optiques d'être à la base de capteurs de courant et le principe de la mesure est basé sur l'effet Faraday. Cet effet se traduit par la rotation du plan de polarisation (θ) d'une onde polarisée linéairement lorsque celle-ci traverse un milieu où règne un champs magnétique :

$$\theta = V \int H.dl$$

dirigé suivant la direction de propagation où V est la constante de Verdet (= $4{,}6.10^{-6}$ rad/A).

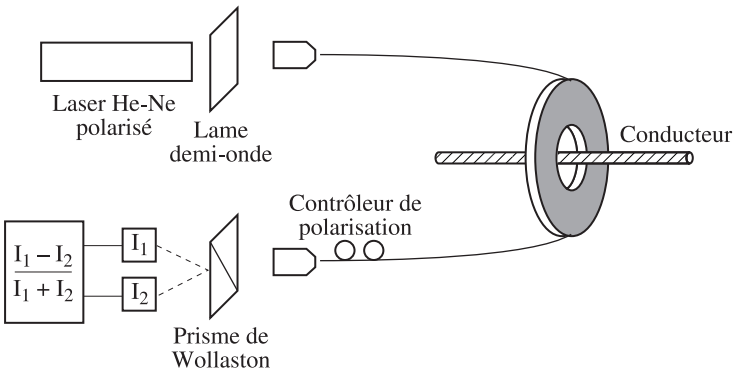


Figure 9.21. *Schéma de principe d'un capteur de courant basé sur l'effet Faraday*

La figure représente la configuration type d'un capteur de courant à fibre. La fibre, à l'intérieur de laquelle est couplée une onde polarisée linéairement, est enroulée sur N tours autour de l'élément conducteur. Le champs magnétique associé :

$$\int H.dl = N.I$$

au courant I circulant dans le conducteur créé une rotation du plan de polarisation, soit, $\theta = V.N.I$.

Cette rotation induite par le courant parcourant le conducteur est relativement faible par rapport à la biréfringence linéaire des fibres et il faut donc minimiser cette dernière soit en torsadant la fibre lors de l'enroulement [GRA 82], soit en effectuant un recuit sur les fibres torsadées [ROS 96].

9.4.4.3. *Capteurs de rotation : gyroscope*

Le gyroscope à fibre est basé sur l'effet Sagnac et le montage type est représenté figure 9.22.

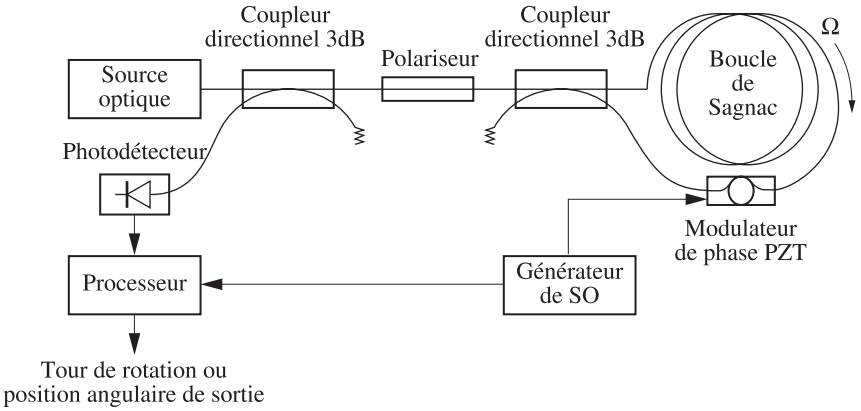


Figure 9.22. *Schéma de principe du gyroscope à fibre*

Le faisceau issu d'une source, large spectralement, après passage à travers deux coupleurs 3 dB et un polariseur, est injecté à travers une boucle constituée d'une fibre unimodale à maintien de polarisation. Une partie de l'onde traverse la boucle dans le sens des aiguilles d'une montre tandis que l'autre partie la traverse en sens inverse. Après passage dans la boucle, les deux faisceaux sont recombinés, puis retraversent les coupleurs avant d'être détectés. En l'absence de pertes intrinsèques du système, si l'ensemble ne subit aucun déplacement, les coupleurs engendrant chacun un déphasage de $\pi/2$, l'ensemble de la puissance injectée dans le système se trouve détectée. Par contre, si l'ensemble subit une rotation de vitesse angulaire Ω, une différence de phase $\Delta\phi$ est induite par effet Sagnac entre les deux sens de propagation dans la boucle : la boucle étant en mouvement, une onde voit un chemin optique plus important que l'autre [BUR 94].

$$\Delta\phi = \frac{8\pi NA\Omega}{c\lambda}$$

où N est le nombre de tours dans la boucle, A l'aire de la boucle et λ la longueur d'onde.

9.4.5. *Convertisseurs de fréquence non linéaire*

Le caractère centro-symétrique de la silice interdit *a priori* toute non-linéarité d'ordre pair en empêche donc la fabrication de composants actifs tels que modulateurs et convertisseurs de fréquence. Il y a une dizaine d'années, l'observation d'un processus de doublage de fréquence dans une fibre à base de silice suscita une vive curiosité [OST 86]. Ce phénomène présentait alors un intérêt plus fondamental qu'appliqué en raison des faibles non-linéarités observées, inférieures de quatre ordres de grandeurs à celles des meilleurs cristaux non linéaires. La situation vient d'évoluer puisque une valeur a été publiée du coefficient électro-optique de 6 pm/V dans une fibre germanosilicate préparée par application d'un champs électrique. Après ce traitement, la non-linéarité s'avère stable.

Ce phénomène de χ^2 artificiel doit permettre la génération d'harmonique et d'effets paramétriques, à condition de maintenir l'accord de phase le long de la propagation. Cette dernière condition n'est jamais réalisée à cause de la dispersion du matériau : les interactions entre les ondes (ω et 2ω dans le cas de la génération d'harmonique) sont constructives sur une longueur caractéristique Λ, puis destructives sur la longueur Λ suivante. Cependant, le déphasage accumulé peut être compensé en annulant périodiquement toutes les longueurs caractéristiques Λ le coefficient non linéaire : c'est la technique du quasi-accord de phase. Pour ce faire deux techniques sont étudiées à l'heure actuelle. La première consiste à appliquer périodiquement le champs électrique polarisant sur des électrodes distantes de Λ [PRU 99], tandis que dans la seconde, une insolation UV vient effacer de manière périodique la non-linéarité préalablement créée longitudinalement de manière homogène [BON 00].

Les applications potentielles de la création de χ^2 avec quasi-accord de phase sont nombreuses : sources à basse longueur d'onde (stockage optique) pour le doublage de fréquence et sources modulées accordables dans le proche infrarouge (multiplexage en longueur d'onde, lidars) pour les effets paramétriques.

9.5. Applications des fibres en verres de basse énergie de phonon

9.5.1. *Introduction*

Malgré le nombre immense d'applications basées sur des fibres en silice, et le succès commercial qu'on leur connaît, un gros effort s'est porté sur d'autres verres, afin d'offrir des fonctionnalités irréalisables avec la silice. Deux propriétés, en particulier, nécessitaient la recherche de nouveaux matériaux fibrables : d'une part étendre la transmission des fibres vers l'infrarouge, au-delà de 9-15 μm afin de transmettre la puissance des lasers à gaz (CO_2), et d'autre part mettre en œuvre certaines transitions optiques des ions de terre rare, inopérantes dans les verres d'oxydes. En particulier, des lasers fibrés ou amplificateurs devaient être démontrés dans le visible ou l'infrarouge (2-5 μm) pour les premiers, ou 0,8 μm, 1,3 μm et 1,5 μm à large bande, pour les seconds.

9.5.2. *Fibres transparentes dans l'infrarouge*

Les verres étudiés pour transporter des faisceaux laser à 5 μm, ou 10 μm (pour la chirurgie ou la découpe de matériaux) ont été les halogénures à base de chlore ou d'iode, les chalcogénures et les chalcohalogénures. Les premiers se sont avérés chimiquement instables vis-à-vis de l'humidité, et les seconds trop sensibles à la pollution par des impuretés, et à la dévitrification. Par contre, d'excellents résultats ont été obtenus avec des chalcohalogénures, les verres dits « TeX » [LUC 86] à base de Te, Se, S, Cl, Br et I. Par exemple, une fibre de composition $Te_3Se_4I_3$, a une plage de transmission constante de 7 à 11,5 μm, avec une perte inférieure à 5 dB/m (attribuée principalement à des défauts tels que bulles, et non au verre lui-même). Récemment, de grands progrès dans la purification des produits de départ, et pendant la fabrication, de fibres multimodes (cœur de 800 μm) de type As-S et As-Se. Appliquées à la transmission d'un laser à électron libre vers 6 μm, pour la chirurgie, celles-ci ont des pertes inférieures à 0,5 dB/m [SHA 00]. De plus ces fibres supportent des impulsions supérieures à 40 mJ (moyenne 1,3 W, intensité de 1,6 GW/cm^2.

9.5.3. *Applications de fibres dopées aux terres rares*

9.5.3.1. *Avantages et désavantages des verres à basse énergie de phonon*

Les fibres en verres fluorés, particulièrement en ZBLAN et ses modifications, dopées de diverses terres rares, ont permis la démonstration de lasers visibles (du bleu au rouge), pompés par diode laser, par la technique du pompage par *up-conversion*. Ce fonctionnement, décrit section 9.2, permet la génération d'un photon visible par un ion de terre rare, après absorption de deux (ou plus) photons de pompe. La seconde absorption s'effectue par l'intermédiaire d'une transition

résonante entre deux niveaux excités. Pour être effective et applicable, la durée de vie totale du niveau énergétique intermédiaire doit être suffisamment longue (typiquement supérieure à quelques dizaines à centaines de µs). De plus, la durée de vie totale du niveau supérieur, dans le cas des lasers visibles (à ~15 000-25 000 cm^{-1}), doit elle aussi être suffisamment longue pour permettre l'établissement d'une inversion de population, et donc d'un gain optique. Seuls les verres à basse énergie de phonon offrent à la fois ces deux conditions, car les désexcitations spontanées des niveaux énergétiques (intermédiaire(s) et final) sont le plus souvent principalement radiatives ([FRA 91], p. 184-186).

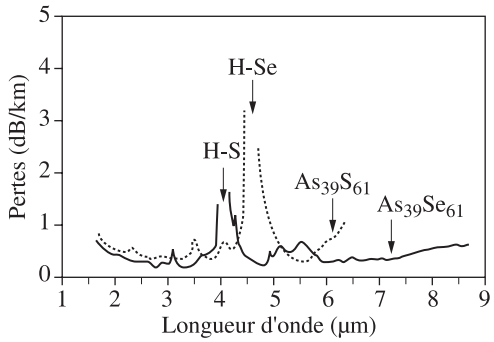


Figure 9.23. *Transmission spectrale de fibres en chalcogénures d'arsenic [SHA 00]*

Les verres fluorés (tel que ZBLAN) et certains verres chalcogénures (GLS) peuvent intrinsèquement être fortement dopés en terres-rares, en substitution des ions de La^{3+}, jusqu'à plusieurs at %. Ceci offre l'avantage par rapport à la silice (concentration souvent limitée à quelques 0,1 at %, voire moins) de réaliser des dispositifs à fibres plus courts. Enfin, les verres d'indice de réfraction très élevé (> 2 pour les chalcogénures) par rapport aux oxydes ($n \sim 1{,}5$) offrent des sections efficaces des transitions optiques plus grandes, améliorant encore leur efficacité quantique (car la force d'oscillateur d'une transition électronique, et donc la section efficace, varie approximativement d'un matériau à l'autre comme n^3) [HEW 93, REI 97]. Toutefois, comme souligné plus haut, la fabrication de fibres de bonne qualité et unimodales est beaucoup plus compliquée que pour la silice, augmentant le prix de revient des dispositifs basés sur les fibres en verre à basse énergie de phonon. La relative faible stabilité chimique (à la température et à l'humidité) de ces verres pose aussi le problème de leur fiabilité. Enfin, la connexion de ces fibres à des systèmes basés sur la silice ne peut se faire que par connecteurs minimisant les pertes aux interfaces silice/verre mou, et non par soudure.

9.5.3.2. *Sources laser visibles et infrarouges*

Les terres rares les plus mises en œuvre dans les lasers à fibres optiques en verre fluorés (ZBLAN) ou chalcogénures (GLS) sont : Nd^{3+}, Er^{3+}, Tm^{3+}, Pr^{3+}, Ho^{3+}.([FRA 91], p. 187-197), [HEW 93]. Le thulium, l'erbium et le praséodyme présentent des transitions dans le visible, respectivement bleue (450 nm), verte (550 nm) et rouge (635 nm), présentant un intérêt pour la génération de couleurs, ou de lasers « blancs » (c'est-à-dire lasant aux trois longueurs d'onde, en puissances respectives pondérables). Un effort plus particulier a été porté sur le laser bleu, applicable à l'enregistrement de données et à l'imprimerie. L'efficacité de ces systèmes repose sur l'efficacité de pompage, pouvant mettre en œuvre plusieurs (le plus souvent deux) longueurs d'onde de pompe et des transferts d'énergie non radiatifs entre ions de terre rare.

Les transitions infrarouges, dans ZBLAN ou GLS, ont été explorées plus récemment, tirées par le besoin de sources lasers pouvant sonder des raies d'absorption de molécules ou de polluants (méthane vers 1,7 µm, eau vers 3 µm...) [SCH 97]. On recherche encore un grand domaine d'accordabilité en longueur d'onde autour de 2,8 µm. Ceci a été dernièrement démontré, sur une plage aussi large que 120 nm, dans un laser en fibre ZBLAN dopée Er^{3+}, pompé par diode laser à 0,8 µm [LIB 00].

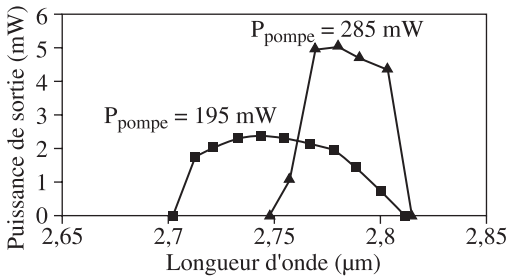


Figure 9.24. *Spectres d'accordabilité d'un laser à fibre en ZBLAN, dopée Erbium, en fonction de la puissance de pompe à 790 nm [LIB 00]*

9.5.3.3. *Amplificateurs pour télécommunications (à 0,8, 1,3 et 1,55 µm)*

Les fibres en verres de basse énergie de phonon présentent, en principe, un grand avantage par rapport à celles en silice : les transitions vers 1,3 µm (seconde fenêtre de télécommunications, pour laquelle il n'existait pas d'amplificateur à fibre optique équivalent à l'EDFA) de quelques terres rares (Nd^{3+}, Pr^{3+}, et Dy^{3+}) ne présentent pas ou peu de gain dans la silice. Le ZBLAN, grâce à une énergie de phonon 2 à 3

fois moindre que celle de la silice, a permis la démonstration du premier amplificateur à fibre optique dopée Pr^{3+} à 1,3 µm [YAM 92], malgré une faible efficacité globale de 4-5 %. Depuis, les efforts se sont poursuivis sur cet ion, mais dans d'autres matériaux d'indice plus élevé et de meilleure efficacité quantique. Aussi, le dysprosium (Dy^{3+}) présente une émission intense vers 1,3 µm et a été testé dans GLS.

Toutefois, la principale application commerciale des fibres en ZBLAN, dopées Er^{3+}, est leur utilisation dans des amplificateurs « hybrides », pour télécommunications autour de 1,55 µm. En effet, l'emploi en série (ou en parallèle) d'un amplificateur dopé erbium en fibre silice et d'un en verre fluoré permet d'aplatir la courbe de gain, qui s'élargit de ~30 nm à environ le double. Ainsi, ces amplificateurs permettent d'augmenter les performances des système de télécommunications basés sur le multiplexage de longueurs d'onde dense (DWDM).

9.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des matériaux fibrés, essentiellement à ceux à base de silice et aux verres à faibles énergies de phonons.

Les fibres à base de silice ont connus durant ces dernières années un développement considérable. Dans les années 1970, les efforts portés sur la pureté des matériaux ainsi que sur les nouveaux procédés d'élaboration ont permis de baisser de presque quatre ordres de grandeur les pertes à la propagation. Une fois les pertes minimisées, les efforts ont portés sur le dopage intensionnel et spécifique des fibres et l'essentiel des recherches a été axé sur l'amplification optique à partir de fibres de silice dopées erbium. L'adjonction de fibres à faible atténuation et des fibres dopées a révolutionné les techniques de télécommunication : les systèmes actuels de télécommunications à longues distances sont maintenant tout optique et permettent des débits commerciaux avoisinant le terabit/seconde. Autour de cette activité télécom, les fibres de silice se sont également imposées comme composants pouvant traiter le signal : multiplexeurs, coupleurs, réseaux de Bragg photo-inscrits.

Les fibres optiques pouvant supporter de fortes densités de puissance, grâce au confinement de l'énergie, les recherches ont également débouchées sur la réalisation de lasers, que ce soit en mode continu, modes bloqués ou déclenché. Les domaines spectraux couverts par les lasers à fibre s'étendent du bleu au moyen infrarouge. Si les fibres à base de silice sont plus performantes pour des longueurs entre 0,9 et 1,8 µm, les fibres à base de verres à base d'éléments lourds tirent profit de leur faible énergie de phonon pour être à la base des lasers émettant dans le visible et dans l'infrarouge jusqu'aux environ de 2 µm.

9.7. Bibliographie

[BAR 93] BARNES W.L., *Q-switched fiber laser*, M.J.F. Digonnet, M. Dekker (dir.), 1993.

[BAR 78] BARNOSKI M.K. *et al.*, Proc IEEE, 1978.

[BER 96] BERGANO N.S., DAVIDSON C.R., *J. Lightwave Tech.*, 14, 1299, 1996.

[BER 90] BERTHOU H., JORGENSEN C.K., *Opt. Lett. 15*, 1990.

[BIR 95] BIRKS T., *Electron. Lett.*, 31, 1547, 1995.

[BON 00] BONFRATE G., PRUNERI V., KAZANSKY P.G., *CLEO/Europe (Conf. on Lasers and Electro-Optics)*, paper CMO5, Nice, France, 10-15 septembre 2000.

[BRE 00] BRÉCHET F., AUGUSTE J.L., MARCOU J., ROY Ph., PAGNOUX D., BLONDY J.M., *CLEO/Europe (Conf. on Lasers and Electro-Optics)*, paper CME1 (invited), Nice, France, 10-15 septembre 2000.

[BUR 94] BURNS W.K., *Optical Fibers Rotation Sensing*, Academic Press, Boston, 1994.

[COH 79] COHEN G., LIN C., FRENCH W., *Electr.Lett. 15*, 334, 1979.

[DEX 53] DEXTER D.L., *J. Chem. Phys*., 21, 1224, 1953.

[DON 96] DONG L., REEKIE L., CRUZ J.L., PAYNE D.N., *OFC'96*, San José, TuOZ, 1996.

[FEL 00] FELICE V., DUSSARDIER B., MONNOM G., OSTROWSKY D.B., *European Phys. J-Appl. Phys*., n° 2, 11, 107, 2000.

[FOR 48] FÖRSTER T., *Ann. Phys.*, 2, 75, 1948.

[FRA 91] FRANCE P.W. (dir.), *Optical Fibre Lasers and Amplifiers*, Blackie, Glascow, 1991.

[GHA 99] GHATAK A., THYAGARAJAN K., *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge University Press, 1999.

[GRA 82] GRAINDORGE P., THYAGARAJAN K., ARDITTY H., PAPUCHON M., *Opt. Commun.*, 41, 164, 1982.

[GRA 95]. GRATTAN K.T.V., Meggitt B.T., *Optical Fiber Sensor Technology*, Chapman and Hall , Londres, 1995.

[HAN 90] HANNA D.C., PERCIVAL R.M., PERRY I.R., SMART R.G., SUNI P.J., TROPPER A.C., *J. Modern Optice*, 37, 517, 1990.

[HEN 89] HENDERSON B., IMBUSH G.F., *Optical Spectroscopy of Inorganic Solids*, Oxford Science Publications, Clarendon Press, 1989.

[HEW 93] HEWAK D.W., *Electron. Lett*. 29, 237, 1993.

[IZA 77] IZAWA I., SHIBATA N., TAKEDA A., *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31,, (1977) 33.

[JUM 96] JUMA S., Laser Focus World, 11, 55, 1996.

[KAS 90] KASHYAP R., ARMITAGE J.R., WYATT R., DAVEY S.T., WILLIAMS D.L., *Electron. Lett*., 26, 730, 1990.

[KOE 64] KOESTER C.J., SNITZER E., *Appl. Opt. 3*, 1182, 1964.

[LEM 93] LEMAIRE P.J., ATKINS R.M., MIZRAHI V., REED W.A., *Electron. Lett.*, 29, 1191, 1993.

[LIB 00] LIBATIQUE N.J.C., TAFOYA J.D., VISWANATHAN N., JAIN R.K., *CLEO 2000 (Conf. on Lasers and Electro-Optics)*, paper CThV8, San Franscisco, Etats-Unis, 2000.

[LUC 86] LUCAS J., ZHANG X.H., *Mat. Res. Bull.*, 21, 871, 1986.

[MAT 71] MATTESON I.B.C., LEE J., *Chem. Phys. Lett*, 8, 173, 1971.

[MAU 95] MAURICE E., MONNOM G., DUSSARDIER B., SAISSY A., OSTROWSKY D.B., BAXTER G.W., *Appl. Opt.*, 34, 8019, 1995.

[MEA 85] MEARS R.J., REECKIE L., POOLE S.B., PAYNE D.N., *Electron. Lett.*, 21, 738, 1985.

[MEL 89] MELTZ G., MOREY W.N., GLENN W.H., *Opt. Lett.*, 14, 823, 1989.

[MID 79] MIDWINTER J.E., *Optical Fibres for Transmission*, J. Wiley, New York, 1979.

[MOR 94] MOREY W.W., BALL G.A., MELTZ G., *Opt. Photon. News*, 8, 1994.

[NIL 00] NILSSON J., GRUDININ A.B., TURNER P.W., *CLEO/Europe (Conf. on Lasers and Electro-Optics)*, paper CFH1, Nice, France, 10-15 septembre 2000.

[OKO 82] OKOSHI T., *Optical Fibers*, Academic Press, New York, 1982.

[OST 86] OSTERBERG U., MARGULIS W., *Opt. Lett.*, 11, 516, 1986.

[OUE 87] OUELLETTE F., *Opt. Lett.*, 12, 847, 1987.

[PAT 96] PATRICK H.J., WILLIAMS G.M., KERSEY A.D., PEDRAZZANI J.R., VENGSARKAR A.M., *IEEE Photon. Tech. Lett*, 8, 1223, 1996.

[PHI 93] PHILLIPS M.W., *Mode-locked fiber lasers*, dans M.J.F. Digonnet, M. Dekker (dir.), 1993.

[PRU 99] PRUNERI V., BONFRATE G., KAZANSKY P.G., RICHARDSON D.J., BRODERICK N.G., DESANDRO J.P., SIMONNEAU C., VIDAKOVIC P., LEVENSON J.A., *Opt. Lett.*, 24, 208, 1999.

[RAW 80] RAWSON H., *Properties and Applications of Glasses*, vol. 3, Glass Science and Technology, Elsevier, 1980.

[REE 87] REEKIE L., JAUNCEY J.M., POOLE S.B., PAYNE D.N., *Electron. Lett.*, 23, 884, 1987.

[REI 77] REISFELD R., JORGENSEN C.K., *Lasers and Excited States of Rare Earths*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1977.

[REI 87] REISFELD R., JORGENSEN C.K., *Excited State Phenomena in Virteous Materials*, vol. 58, Handbook on the Phys., Chem. of Rare Earths, Elsevier, 1987.

[ROS 96] ROSE A.H., REN Z.B., DAY G.W., *J. Lightwave Tech.*, 4, 2492, 1996.

[SCH 74] SCHULZ P.C., *J. Am. Ceram. Soc.*, 57, 309, 1974.

[SCH 97] SCHWEIZER T., HEWAK D.W., SAMSON B.N., PAYNE D.N., *J. Lum.*, 72-74, 419, 1997.

[SHA 00] SHAW L.B., BUSSE L.E., NGUYEN B., SANGHERA J.S., AGGARWAL I.D., KUNG F.H., MOSSADEGH D., MONGIN D., Peavy G.M., *CLEO 2000 (Conf. on Lasers and Electro-Optics)*, paper CThM74, San Franscisco, Etats-Unis.

[SNI 61] SNITZER E., *Phys. Rev. Lett.*, 7, p. 444, 1961.

[SNI 83] SNITZER E., MOREY W.W., GLENN W.H., *OFS'83*, Londres, 1983.

[STR 96] STRASSER T.A., *OFC'96*, San José, TuO1, 1996.

[SUN 89]. SUN M.H., WICKERSHEIM K.A., KIM J., *Optical Fiber in Medecine IV SPIE 1067*, 15, 1989.

[TOW 87] TOWNSEND J.E., POOLE S.B., PAYNE D.N., *Electron. Lett.*, 23, n° 7, p. 329-331, 1987.

[UHL 84] UHLMANN D.R., KREIDL N.J., *Glass Science and Technology 1*, 290 et 300, 1984.

[YAM 92] YAMADA M., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 9, 994, 1992.

[ZAR 91] ZARZYCKI J. (DIR.), *Glasses and Amorphous Materials*, Materials Science and Technology, vol. 9, Cambridge VCH, 1991.