

Les fibres optiques monomodes

Quand la science des matériaux et de l'optique se propagent à la même vitesse

Avec l'engorgement des autoroutes de l'information, on impose aux fibres optiques des débits d'information de plus en plus élevé (30 canaux à 40 Gbits/s ont été publiés à OFC'98). Ces améliorations entraînent des recherches fondamentales dont certaines sont présentées ici. Dans cet article, je décris quelles sont les caractéristiques optiques des fibres monomodes, comment elles sont élaborées, dans quelles applications autres que le transport d'information on les rencontre : fibres amplificatrices, éléments réflecteurs à base de filtre de Bragg. L'objectif est de montrer que des problèmes de mise en œuvre industrielle entraînent parfois une réflexion fondamentale. C'est ainsi que l'on découvre que la physicochimie dans les verres est très différente de celle en milieu liquide ou cristallin. La maîtrise de la microstructure d'un verre est un objectif important pour les applications industrielles. Ici, des défauts ponctuels de la silice sont utilisés pour obtenir des variations permanentes d'indice ou des effets non linéaires.

Les fibres optiques, vous en avez entendu parler pour internet, au sujet de la construction des autoroutes de l'information. Vous savez à travers la lecture de vos quotidiens ou revues préférés que grâce à elles vous pourrez recevoir de plus en plus de services sur votre ordinateur personnel (voir le très bon article paru dans la *Recherche* n° 297, avril 1997, p. 64. Des millions de conversations dans une fibre optique). Vous n'avez pas oublié vos cours de premières années expliquant que la lumière est guidée par réflexion multiple dans des milieux transparents (eau ou verre), ce qui permet d'obtenir des effets aussi jolis que spectaculaires dans les fontaines lumineuses parisiennes ou les lampadaires en fibres de verre. Les fibres utilisées pour le transport et le traitement de l'information sont très différentes des premières fibres inventées par le Français I. Dubus-Bonnell en 1836. Celles-ci étaient obtenues par simple étirage dans le chalumeau, de verres multicomposants contenant silice, oxyde de bore, oxydes alcalins et bien d'autres oxydes encore. Leur diamètre était large et assez irrégulier. Les fibres actuelles perfectionnées en 1955 par l'anglais N. Kapani sont élaborées à partir

de silice et d'oxydes ultra purs et ont un diamètre de 125,0 microns à 0,1 microns près. Elles présentent en elles une structure d'indice guidante. Dans les premières fibres de transport (vers les années 1960 à 1980), la lumière se propageait sous forme de faisceau (ensemble de rayons lumineux) se réfléchissant totalement sur les surfaces internes suivant les relations de Descartes. Dans les fibres actuelles, c'est un rayon lumineux qui se propage « attiré » par un indice légèrement plus élevé au centre : le cœur de la fibre. Du fait, de la taille du cœur comparable à celle de la longueur d'onde, la propagation est quantifiée sous forme de modes. Ces modes ne se propagent pas à la même vitesse ; s'ils portent le même message, ce dernier sera finalement brouillé. Pour éviter cela, les ingénieurs ont compris qu'il suffisait de diminuer le diamètre du cœur jusqu'à 4 à 6 microns. Cette exigence a conduit à mettre au point des méthodes d'élaboration de dépôt en phase vapeur (CVD en anglais, brevet Corning Glass Works 1970) (voir encadré *Elaboration d'une fibre monomode et structure*).

La première utilisation des fibres est le transport des télécommunications, un article déjà cité plus haut de mes collègues

d'Alcatel-Alsthom décrit tous les espoirs que suscitent les progrès récents réalisés sur ce fil de verre. Mais, si le transport est une fonction à assurer pour l'acheminement des gros volumes d'information, le traitement du signal doit lui aussi être réalisé à la vitesse de la lumière. Pour cela, on utilise des fibres de structure interne encore plus élaborée contenant parfois des dopants spécifiques de la fonction à assurer. Ainsi, il est nécessaire pour les liaisons sous-marines de réamplifier le signal optique à intervalles réguliers (100 km). Cette fonction est assurée par des fibres dont le cœur est dopé avec de l'erbium (typ. 500 ppm). L'erbium est pompé par une source super lumineuse (une diode laser AsGaAl émettant vers 1,38 microns) de son état fondamental $4I_{5/2}$ vers un état excité $4I_{13/2}$. Il réémet entre les mêmes niveaux (mais pas les mêmes sous-niveaux) vers 1,4-1,55 microns. Cette fibre étant soudée à la fibre de transport, le signal la traverse et se retrouve amplifié. D'autres amplificateurs fonctionnant à d'autres longueurs d'onde sont à l'étude pour d'autres applications.

Pour réaliser un laser à partir d'une fibre comme celle décrite ci-dessus, il suffit de for-

ELABORATION ET STRUCTURE D'UNE FIBRE MONOMODE

La réalisation d'une fibre optique s'effectue en deux étapes : la fabrication d'une préforme et le fibrage. La préforme (comme son nom l'indique) possède la même structure interne que la fibre en final, mais elle possède un diamètre de 15 à 100 mm suivant la destination (recherche ou production) et une longueur de 1 à 1,5 m. Elle est réalisée sur un tour de verrier à partir d'un tube de silice de haute pureté (concentration en OH de l'ordre de quelques ppm ou moins, qualité Heraeus de Heraeus, par exemple). A l'intérieur de ce tube sont déposées par couches successives de 10 microns, les différentes structures de la future fibre : le cœur et la gaine optique isolant ce cœur du tube de qualité optique insuffisante pour le transport des télécommunications sur des grandes distances. Il faudra entre 12 et 32 couches pour la gaine et 4 à 10 pour le cœur. Les dépôts sont le résultat de l'oxydation de chlorures de silicium, de germanium, de phosphore ou de fréon. La réaction d'oxydation est contrôlée précisément par un ensemble de débitmètres massiques maîtrisant les concentrations, la température du chalumeau (entre 1 700 et 1 900 °C) et la pression (fig. 2). La réaction s'effectue en trois étapes : la formation des suies lors du passage des gaz dans le chalumeau, le dépôt des suies en avant du chalumeau et la vitrification des suies quand le chalumeau se déplace. Une fois les différentes couches déposées et la structure terminée, il demeure un trou qu'il faut refermer. Cela s'effectue par augmentation de la température du chalumeau jusqu'au ramollissement du tube qui par tension superficielle se rétrécit en même temps que les mors du tour s'éloignent.

L'étape suivante est le fibrage (fig. 3). La préforme est placée au sommet d'une tour de près de 10 m de hauteur dans un four graphite. La fibre est formée par simple étirage laminaire; la vitesse et la température de fibrage déterminent son diamètre qui est contrôlé par la diffraction d'un laser. Une fois amorcée, la fibre passe dans une filière pour se recouvrir d'une première couche de résine silicone, celle-ci est polymérisée par irradiation UV. Cette première couche est souple pour ne pas introduire de contrainte sur la fibre mais la protéger des agressions chimiques. Une deuxième couche de polymère, plus résistante mécaniquement est ensuite déposée sur la première.

La structure finale de la fibre est celle que nous voyons sur la figure 4. Le diamètre du cœur est de 4 à 6 microns. Il est constitué de verre binaire de silice contenant entre 6 à 30 % de GeO_2 en mole. La gaine est formée d'une silice dopée de 0,1 à 1 % en mole de phosphore, fluor, germanium. Son indice est comparable à la silice pure mais plus faible de $1 \text{ à } 3 \cdot 10^{-2}$. Les impuretés métalliques dans ces deux parties ne dépassent pas les quelques 10^{-9} . L'atténuation dans le cœur est de l'ordre d'un facteur 10 sur 50 km.

Plusieurs fibres (quatre ou six) sont ensuite noyées dans une graisse contenue dans une structure constituant le câble de transport (fig. 5). Le diamètre du câble est de quelques dizaines de mm pour les liaisons sous-marines.

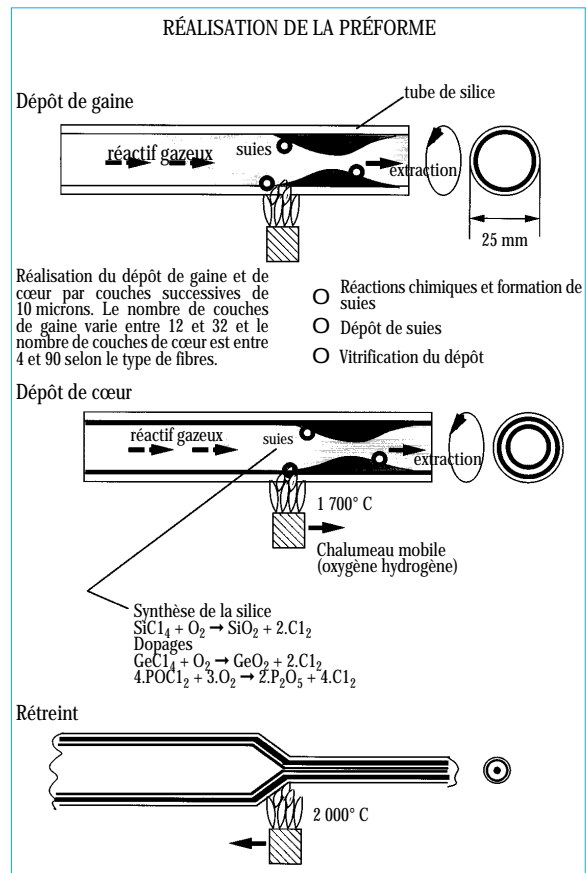


Figure 1. Elaboration d'une préforme par méthode CVD dite modifiée (MCVD).

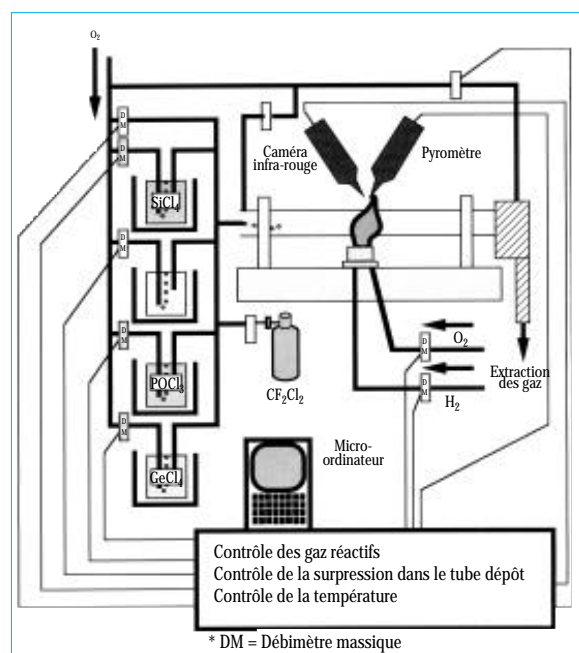


Figure 2. Installation MCVD de réalisation d'une préforme.

© Alcatel-Alsthom Recherche

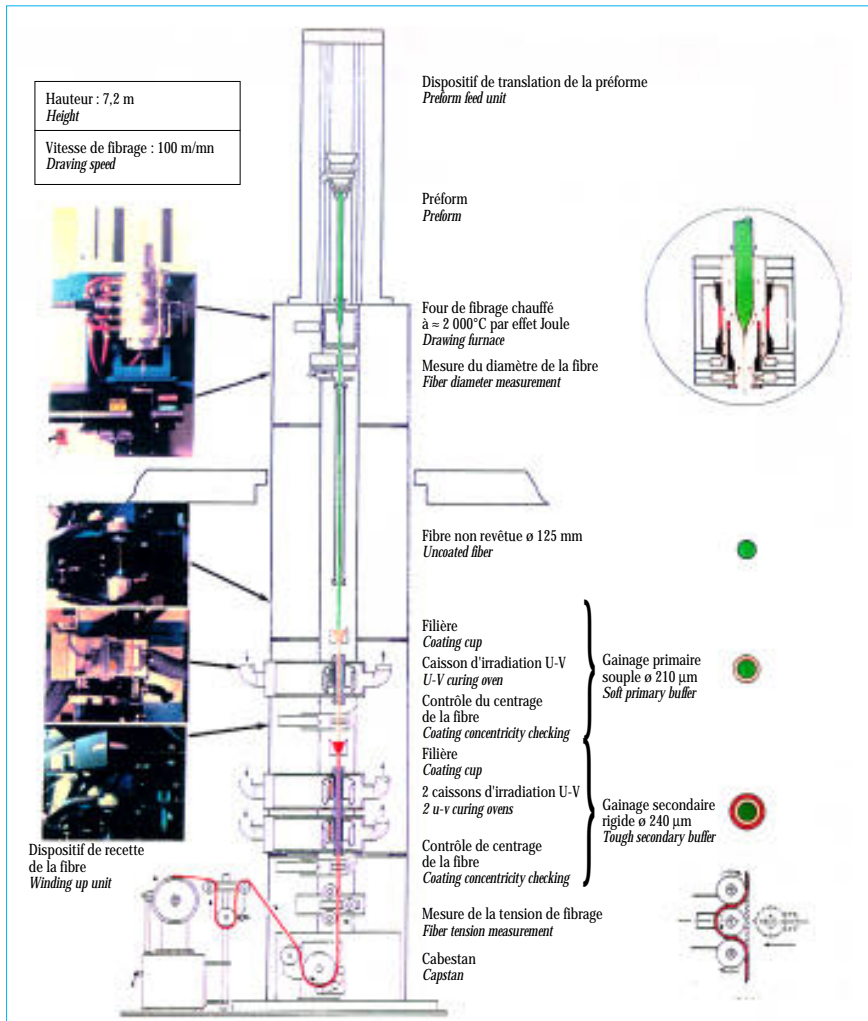


Figure 3. Tour de fibrage.

© Alcatel-Alsthom Recherche

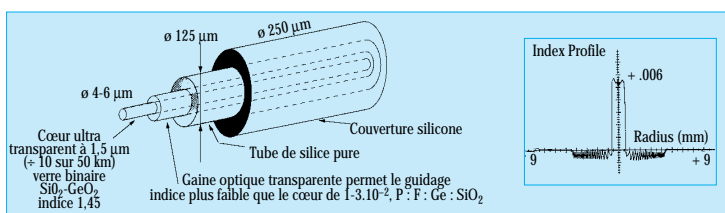


Figure 4. Constitution d'une fibre optique.

mer une cavité résonante. Pour cela, il faut placer de part et d'autre de la cavité amplificatrice, des éléments réfléchissant partiellement. Dans les dispositifs classiques, cette fonction est assurée par des miroirs, l'un réfléchissant totalement et l'autre à 99%. Dans le cas des fibres, il est possible d'utiliser la propriété de photosensibilité aux UV du matériau constituant le cœur pour élaborer des éléments réfléchissants plus performants : les réseaux de Bragg.

Attardons nous quelque peu sur cette application qui est actuellement en plein développement. Il a été remarqué par un chercheur Canadien en 1978 qu'il était possible

d'inscrire de manière permanente des variations périodiques faibles de l'indice de réfraction en appliquant un interférogamme UV sur le côté d'une fibre à cœur germanosilicate. On produit ainsi un réseau d'indice qui suivant la loi de Bragg réfléchit les rayons lumineux dont la longueur d'onde est en accord avec le pas du réseau. Le mécanisme conduisant à cette variation d'indice est en cours d'étude au niveau français dans deux laboratoires :

celui du groupe de P. Niay et M. Douay à Lille et le mien).

Les mécanismes de cette photoréfractivité varient suivant le matériau utilisé, la longueur d'onde du laser ou la durée d'irradiation; certains sont décrits dans l'encadré « Elaboration d'un réseau de Bragg ». L'objectif dans notre groupe est de les modéliser pour les optimiser, découvrir de nouveaux dopants et prévoir les durées de vie des dispositifs.

Pour cela, nous avons recours à des cinétiques spécifiques du milieu vitreux². Dans un milieu solide cristallisé, pour réaliser une réaction physico-chimique, une espèce située en un point doit franchir une barrière énergétique que ce soit pour rencontrer une autre espèce ou pour adopter une autre configuration. Elle est toujours la même quel que soit le lieu où s'effectue la réaction et elle y progressera sans différence. On peut de manière égale, considérer un point et étudier son évolution temporelle ou considérer un intervalle de temps et étudier sa distribution spatiale; cette équivalence s'appelle ergodicité. Dans un milieu vitreux où il existe un désordre à longue distance, les chemins physico-chimiques pour aller d'un état à un autre ne sont plus uniques, il sont nombreux mais certains sont cependant plus fréquents que d'autres. Ils sont distribués et leur statistique correspond au type de désordre du verre. L'énergie d'activation de la réaction chimique est donc d'une manière générale distribuée, elle aussi. Elle peut être plus faible à certains

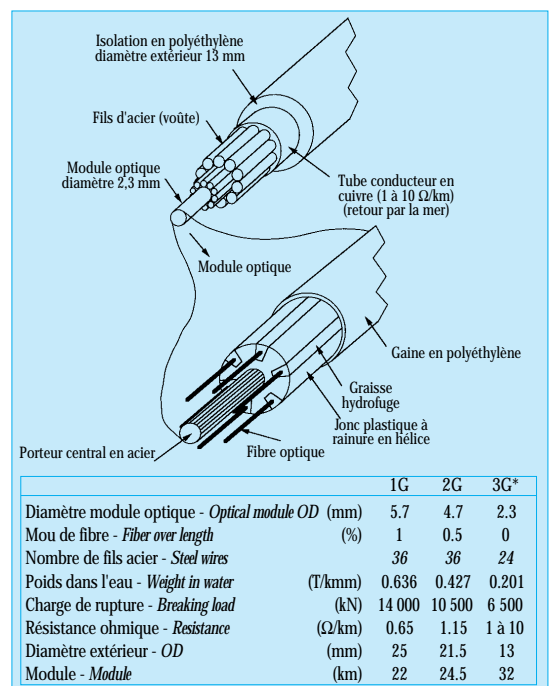


Figure 5. Câbles sous-marins (grand fond) 0,2 T/km.

© Alcatel-Alsthom Recherche

ELABORATION D'UN RÉSEAU DE BRAGG : QUAND UN DÉFAUT DEVIENT UNE QUALITÉ¹

Pour produire des franges d'interférence, on dédouble le faisceau de lumière du laser UV (fig. 6). Puis on fait superposer les deux faisceaux ainsi obtenus. Dans la zone de superposition tous les points ne sont pas à égale distance de la source; la phase des deux ondes issues des deux chemins n'est de ce fait pas la même. Suivant le déphasage la lumière s'ajoute ou se détruit; des interférences apparaissent, elles forment un interférogamme. Celui-ci est alors appliqué à la fibre préalablement dégainée de sa couche de silicium. La lumière UV traverse la partie de la fibre non dopée en germanium et pénètre dans le cœur où elle est fortement absorbée. Il se produit alors des transformations physico-chimiques qui conduisent à une variation d'indice.

Notre compréhension des mécanismes dans les fibres à cœur germanosilicate est la suivante. La première étape est une photoabsorption de la lumière du laser par une bande d'absorption d'un défaut du verre de silice dopée germanium : la lacune d'oxygène. L'absorption par ce défaut donne ensuite lieu à plusieurs transformations :

- 1) création d'autres bandes d'absorption correspondant à d'autres défauts (photochromisme) ;
- 2) augmentation de la densité du verre (photocompaction) ;
- 3) création de contraintes (photoélasticité).

Nous avons déterminé que le premier mécanisme contribuait à la variation d'indice de réfraction pour environ 10 %, le dernier pour environ 20 %, la variation d'indice est donc produit en majeure partie par le second mécanisme. Ces deux derniers produisent une variation de volume locale que nous avons mis en évidence sur des préformes de fibres (fig. 7)¹.

Le réseau ainsi crée se comporte comme un filtre (fig. 8). Un rayon lumineux dont la longueur d'onde est en accord avec la relation de Bragg sera réfléchi alors que les autres longueurs d'onde ne seront pas modifiées. Si on considère un faisceau de grande largeur spectrale, il sera filtré de la longueur d'onde qui est en accord avec le réseau. La finesse du filtrage dépend du nombre de traits par unité de longueur et de l'intensité de la variation d'indice imprimée. On a démontré qu'une finesse de 500 MHz était possible. A partir de cet élément, beaucoup d'autres applications sont envisageables, certaines sont citées sur la figure 9.

1. Hommage rendu au Professeur Jean Rouxel, qui cite dans son article « Chimie des solides : une autre chimie », Lettre des Sciences chimiques n° 65, page 6, que « le défaut devient souvent plus important que la matrice qui le contient ».

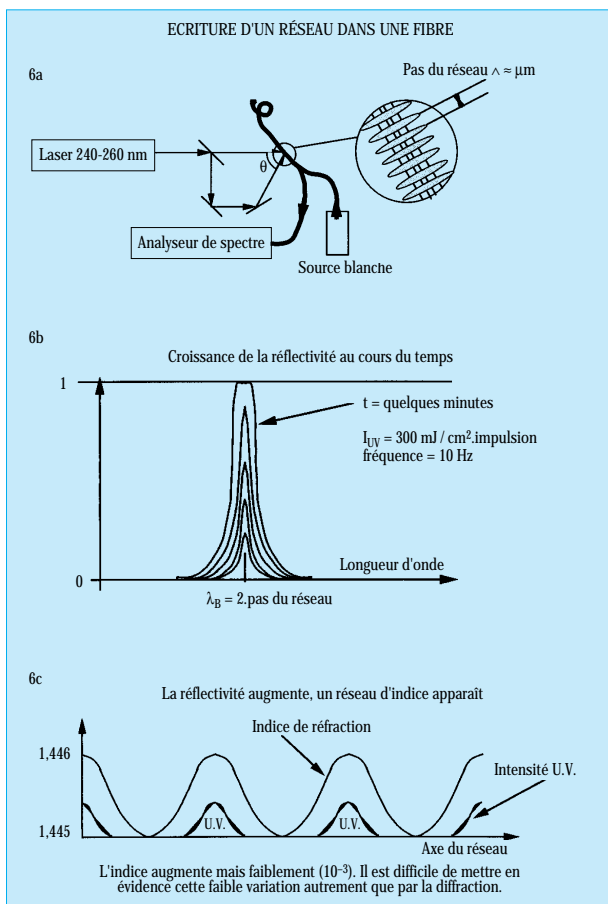


Figure 6. Dispositif d'écriture.

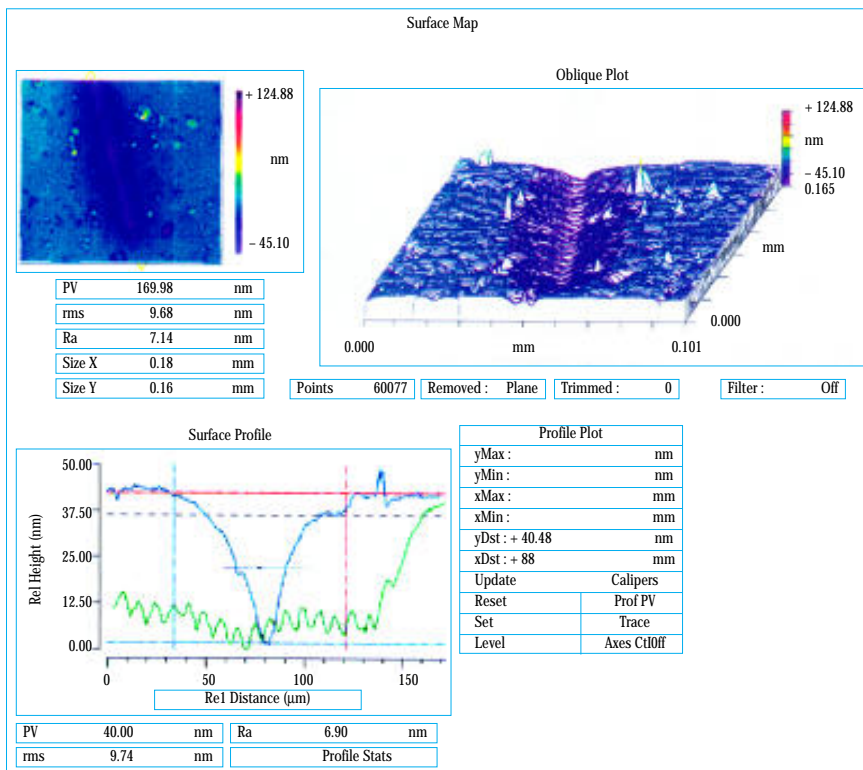


Figure 7. Ondulations de surface produites par l'interaction de l'interférogamme UV avec la surface du cœur d'une préforme de fibre.

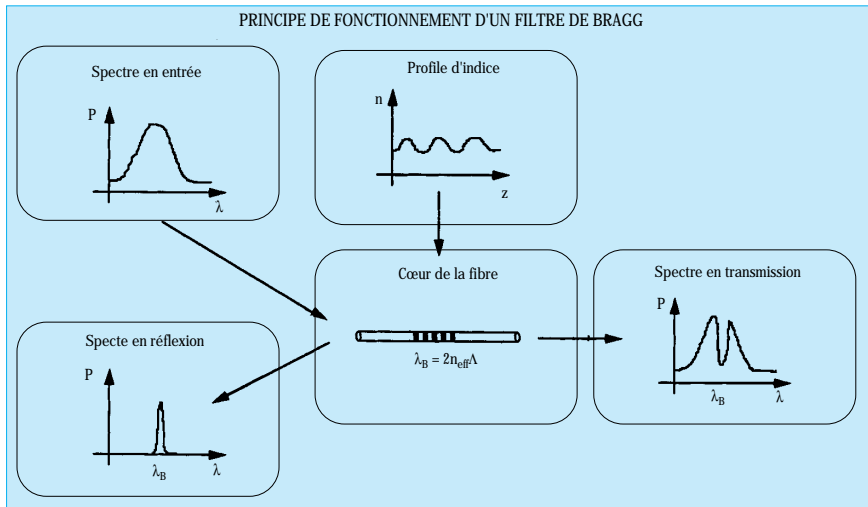


Figure 8. Fonction filtrante d'un réseau de Bragg.

© Alcatel-Alsthom Recherche

endroits que d'autres; la réaction élémentaire se fera alors plus rapidement. Cela implique qu'à certains endroits dans le solide, la réaction sera terminée alors qu'à d'autres elle n'aura pas commencé. La propriété d'ergodicité a disparu. Ce phénomène est passionnant à certains égards. On peut par exemple considérer qu'une réaction est une horloge. Le degré d'avancement permet de connaître la durée écoulée. Dans le verre, du fait de la variété d'énergie d'activation, ces horloges ne vont pas à la même vitesse. Le temps ne s'écoule pas de la même façon en tout point du verre. Certains points sont dans le passé alors que d'autres sont déjà dans le futur. Ainsi le verre, possède son histoire inscrite dans sa structure. Plus encore, on peut montrer que du fait de la distribution d'énergie, la stabilité d'une transformation augmente avec la durée du traitement ou sa température. C'est exactement comme

le clou dans une planche en bois; il tient d'autant mieux qu'on l'enfoncé. Par ailleurs, si on recuit le matériau on augmente la stabilité relative du système, on efface les réactions les moins stables en progressant vers les plus stables, celles qui sont demeurées dans le passé; on voit là que l'on peut remonter d'une certaine façon dans le temps.

Les progrès effectués dans le domaine de ces cinétiques non-ergodiques permettent d'améliorer les prédictions de durée de vie des systèmes à base d'effets photoréfractifs.

D'autres effets sont étudiés dans les fibres optiques, c'est le cas d'effets non linéaires^{3, 4}. Je ne peux les exposer tous. Parmi les plus importants actuellement, la propagation des solitons (impulsions solutions particulières des équations de propagation; elles ne diminuent pas d'amplitude au cours de la propagation) impliquent une

conjugaison de la dispersion chromatique linéaire et non linéaire. La première contribution linéaire a une tendance à élargir une impulsion, la seconde non linéaire à la comprimer. En jouant sur la structure du guide et sur l'intensité du signal, il est possible de faire en sorte que les deux se compensent pour permettre une propagation sans déformation et donc plus grande sans amplification.

Généralement les effets non linéaires apparaissent pour des densités de puissance élevées. Or la structure guidante de la fibre est particulièrement adaptée pour permettre la propagation d'une forte densité sur une grande distance. Cet avantage permet d'obtenir des interactions nombreuses même avec des coefficients non linéaires faibles comme ceux de la silice.

Ainsi, on peut citer le Raman stimulé. L'effet Raman est l'émission d'une lumière dont la longueur d'onde diffère de la longueur d'onde incidente d'une quantité correspondant à l'écart entre un niveau d'énergie fondamental et un niveau vibrationnel du matériau (voir encadré : un effet Raman très stimulé.). Cette lumière diffusée est assez puissante pour donner lieu à son tour à une autre lumière diffusée. Au fur et à mesure de la propagation dans la fibre, la lumière verte du laser peut ainsi évoluer vers le jaune jusqu'au rouge. Pour des raisons d'efficacité de couplage, le mode change au cours de la propagation. Ce phénomène donne lieu à de jolies images quand la lumière est collectée en sortie de fibre (voir photo). L'efficacité de cet effet est d'autant plus grande que la fibre contient du germanium mais aussi d'autant plus que la fibre a été élaborée en milieu réducteur.

La fibre peut évoluer sous illumination, la transformation conduisant à une variation d'indice est un exemple. Il en existe d'autres

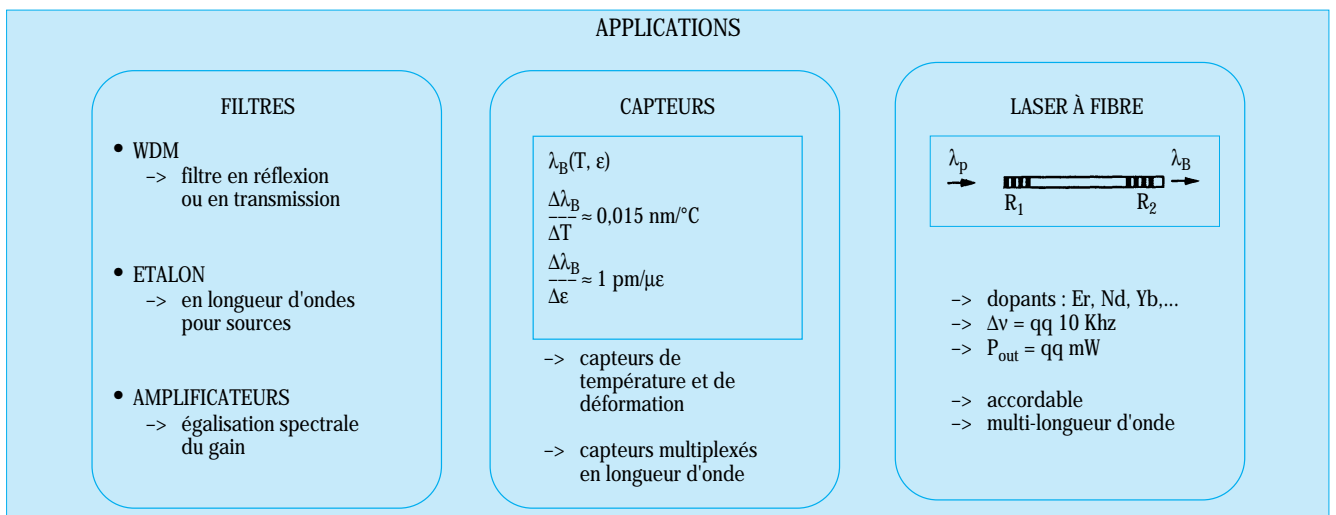


Figure 9. Quelques applications des réseaux de Bragg.

© Alcatel-Alsthom Recherche

UN EFFET RAMAN TRÈS STIMULÉ.

Le phénomène de diffusion Raman est un processus quasi-élastique. Il correspond à la création d'un photon de longueur d'onde plus grande (processus Stokes : physicien irlandais 1819-1903) ou plus court (processus antiStokes). C'est une diffusion cohérente comme la diffusion Rayleigh (qui, elle, est élastique, la couleur bleue du ciel) ou Brillouin (quasi-élastique, couplage avec une onde acoustique). Le schéma de niveaux du processus Stokes est une quasi-absorption

correspondant à une transition du solide de l'état fondamental à un niveau virtuel suivi d'une émission vers un niveau vibrationnel excité. La probabilité d'émission est proportionnelle à la section efficace de diffusion Raman. Pour le processus antiStokes, le chemin est inverse, partant d'un état excité pour rejoindre l'état fondamental. La lumière Stokes est de forme symétrique mais elle est cependant plus faible. Dans le cas d'un effet stimulé, l'intensité

de la lumière de pompage est suffisamment intense pour permettre une inversion de population et par conséquent une amplification du signal Raman spontané. La lumière diffusée est alors proportionnelle à l'exponentielle de la section de diffusion Raman et de la distance de propagation. Elle peut devenir suffisamment intense pour donner lieu à son tour à une autre diffusion et ainsi de suite. Cette succession produit une cascade de raies dont la figure 11 est un exemple.

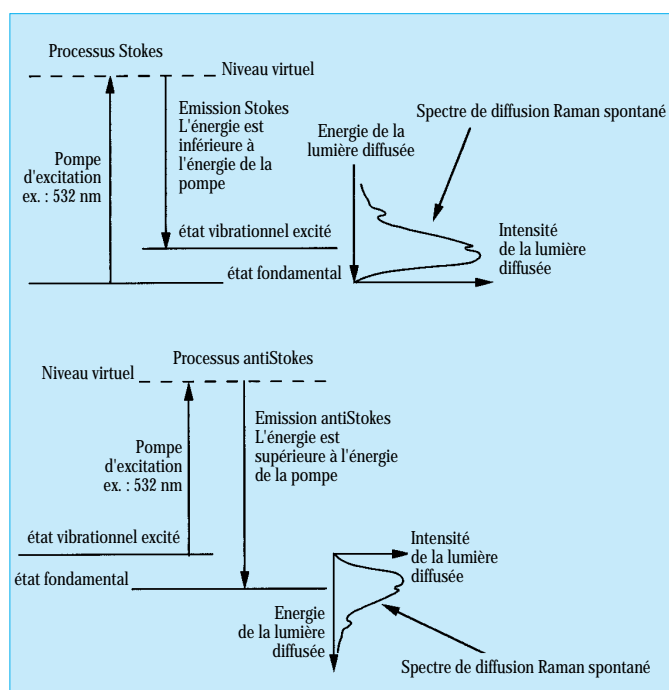


Figure 10. Schéma de niveaux correspondant aux processus Raman (Prix Nobel 1930).

comme le doublage de fréquence. Ce phénomène est l'obtention d'une lumière de longueur d'onde moitié de la lumière de pompe. Ainsi, en utilisant par exemple un laser YAG (le milieu fluorescent est le Grenat d'yttrium et d'aluminium) émettant à 1,064 microns (infrarouge) on obtiendra une lumière dans le vert à 532 nm. Ce phénomène bien connu par ailleurs requiert des conditions d'antisymétrie du milieu et d'accord de phase entre les ondes. La première est satisfaite dans les cristaux; elle est interdite dans les verres du fait de leur structure centrosymétrique. Néanmoins, le doublage de fréquence peut être observé après quelques minutes d'irradiation (voir fig. 13). Il provient d'une part d'une absorption mul-

tiphotonique qui conduit à un déplacement de charges des zones éclairées vers les zones sombres brisant ainsi la symétrie et d'autre part de la superposition des ondes lumineuses (infrarouge et verte) qui construisent d'elles mêmes leur accord de phase. Les études spectroscopiques ont permis de découvrir que des lacunes d'oxygène étaient à l'origine de ce phénomène. Plusieurs effets utiles pour le traitement optique de l'information sont ainsi produits à partir du verre de silice. Leur maîtrise participe à améliorer les qualités des fibres optiques et à progresser sur le chemin de l'application. Mais au fur et à mesure des progrès réalisés sur les matériaux, les structures de fibres sont modifiées, adaptées et

on découvre parfois d'autres phénomènes. Cette synergie qui fonctionne efficacement depuis une dizaine d'années dans les fibres optiques s'oriente maintenant pour réussir l'intégration des fonctions sur des substrats plans (optique intégrée). Une autre histoire commence...

Remerciements :

Enfin, je voudrais remercier chaleureusement mes collègues de l'Université de Lille (P. Niay, M. Douay) et d'Alcatel (J.M. Gabriagues, H. Février, J. Augé, P. Sansonetti, C. Le Sergent, I. Riant) pour l'aide qu'ils m'ont apporté dans la rédaction de cet article.

Fibre à cœur Ge,SiO₂ et gaine P,F : SiO₂

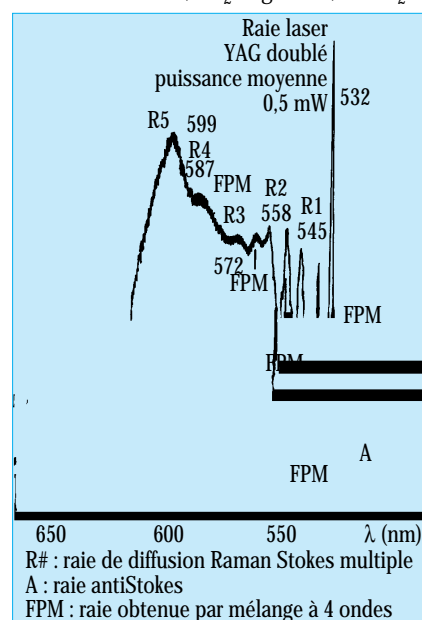


Figure 11. Analyse spectrale correspondant à la photographie en fig. 12. Le spectre est composé d'effets Raman stimulés successifs ainsi que de mélanges de photons (processus à quatre photons).



Fig. 12. Photographie en champ lointain de la lumière collectée à la sortie de la fibre.

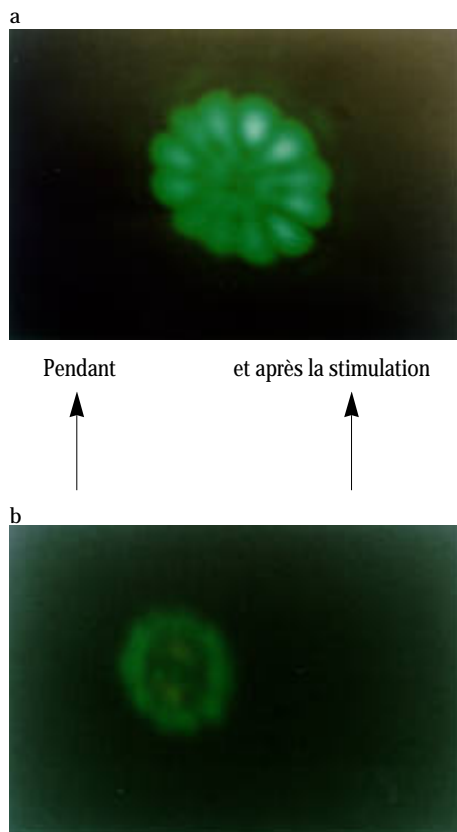


Figure 13. Images en champ lointain. a) lumière d'ensemencement b) lumière engendrée par doublage de fréquence. Du fait de l'intensité suffisamment grande de la lumière verte produite par doublage de fréquence, d'autres couleurs apparaissent provenant principalement d'effets Raman stimulés.

GÉNÉRATION DU VISIBLE À PARTIR DE L'INVISIBLE.

L'injection d'une lumière infrarouge d'intensité suffisamment élevée (10 GW/cm^2) dans une fibre à cœur germanosilicate produit l'apparition au bout de quelques dizaines de minutes d'une lumière visible. Si un laser émettant dans l'infrarouge à 1,064 microns est utilisé, on collecte une lumière verte à 532 nm dont l'intensité croît avec le temps. Au départ, une très faible lumière verte est créée par effet quadri-polaire. Celle-ci est absorbée dans un processus à deux photons par une lacune d'oxygène du matériau ainsi que la lumière infrarouge par absorption à quatre photons. Ces absorptions qui interfèrent entre elles fournissent des électrons qui se délocalisent vers les zones non illuminées en accord de phase avec les ondes infrarouge et verte. La centrosymétrie est ainsi brisée et l'accord de phase construit. Le doublage de fréquence s'effectue alors beaucoup plus efficacement à travers un couplage dipolaire.

Il est possible de surseoir à cette période d'attente en ensemençant la fibre avec une lumière verte extérieure obtenue à l'aide d'un cristal doubleur (KTP par exemple). On peut injecter des lumières infrarouge et verte cohérentes entre elles simultanément dans la fibre pendant quelques secondes avant de couper la composante visible externe; le déplacement de charge est alors construit beaucoup plus efficacement. La figure 13a montre la lumière verte d'ensemencement qui a été injectée ici volontairement dans un mode de propagation d'ordre élevé. La figure 13b faisant apparaître le même mode permet d'affirmer que la génération de lumière visible par la fibre est imprimée par le processus de préparation.

Bibliographie :

1. B. Pommellec and F. Kherbouche (1996). « The photorefractive Bragg gratings in the fibers for telecommunications », *Journal de Physique III*, 6, 1595-1624.
2. B. Pommellec (1998), « Links between writing and erasure (or stability) of Bragg gratings in disordered media ». *Journal of Non-Crystalline Solids*, accepted 01/98.

3. B. Pommellec, J. Delaire, J.F. Delouis and H. Fevrier (1993), « Time response of fluorescence-like emissions in silica-based optical fibers », *Optics Communications* 99, 135-146.
4. B. Pommellec (1994), « Measurement and interpretation of fluorescence-like emission in silica-based optical fiber », *Photosensitivity and self-organisation in optical fibers and waveguides*, Québec, Canada, SPIE.

Bertrand POUHELLEC

Laboratoire de thermodynamique et physicochimie des matériaux
Bât. 415, Université Paris Sud
91405 Orsay Cedex
Tél. : 01 69 15 63 51
Fax : 01 69 15 47 97
E-mail : bp@phebus.isma.u-psud.fr