Les fibres optiques et leur fabrication

Autor(en): **Berthou, H. / Benoit, P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 15

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905409

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Les fibres optiques et leur fabrication

Par H. Berthou et P. Benoît

681.7.068;

Après la définition des quantités qui caractérisent une fibre optique et des mécanismes de pertes, les principaux types de fibres optiques ainsi que leurs processus de fabrication sont décrits, en particulier la déposition par réaction chimique contrôlée en phase vapeur, qui semble être le processus le plus souple quant aux possibilités de fabrication. L'article se termine par la description qualitative des domaines d'application des différents types de fibres.

Einleitend werden die verschiedenen, die Glasfasern kennzeichnenden Grössen und die Verlustvorgänge definiert. Es folgt eine Beschreibung der wichtigsten Typen von Glasfasern sowie von deren Herstellungsverfahren. Unter diesen scheint das chemische Verfahren der kontrollierten Aufdampfung am anpassungsfähigsten zu sein. Abschliessend werden die Verwendungsbereiche der verschiedenen Glasfaserarten beschrieben.

1. Caractéristiques des fibres optiques

1.1 Qu'est-ce qu'une fibre optique?

Les fibres optiques, en vue de leur application à la transmission d'informations, ont connu des développements spectaculaires depuis ces cinq dernières années [1; 2]. La raison principale en est le progrès considérable réalisé dans la fabrication de silice ou de verres composites de très grande pureté [3].

Une fibre optique est un fil de verre composé d'une partie centrale, appelée âme ou cœur, entourée d'une enveloppe appelée «cladding» pour la distinguer de la gaine de protection, généralement en matière plastique (fig. 1). Cette gaine a pour but de protéger la fibre de son environnement extérieur.

Du point de vue optique, le cœur et le cladding sont faits de deux milieux transparents d'indices de réfraction différents mais voisins, de telle façon que l'indice de réfraction du cœur (n_1) soit supérieur à celui du cladding (n_2) [4; 5]. Un rayon lumineux se propage tout au long d'une fibre s'il subit à l'interface cœur-cladding une réflexion totale. Selon la loi de la réfraction ($n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$), l'angle d'incidence α_1 doit être *supérieur à* un angle critique α_c (fig. 2) donné par

$$\alpha_c = \arcsin n_2/n_1 \tag{1}$$

Si le rayon lumineux a une incidence inférieure à α_c, il passe dans le cladding, d'où une perte de puissance optique.

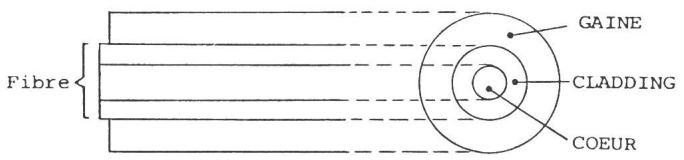

Fig. 1 Eléments de composition d'une fibre optique

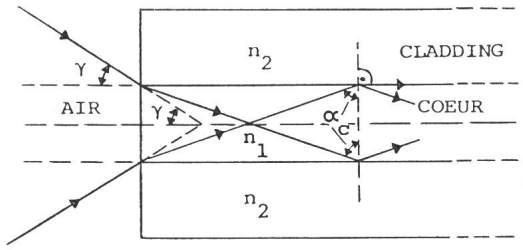

Fig. 2 Pénétration et propagation d'un rayon lumineux dans une fibre optique

n_1, n_2 indice de réfraction
α_c angle limite de reflexion totale (angle critique)
γ angle d'ouverture (ouverture numérique)

Par un calcul simple, on peut associer à cette condition de propagation ($\alpha_1 > \alpha_c$) la notion d'angle d'ouverture, appelé aussi ouverture numérique (NA) d'une fibre. L'angle d'ouverture γ correspond à l'angle d'incidence maximum que peut faire un rayon émis par une source lumineuse (placée face à la section d'une fibre), pour que ce dernier, après réfraction à l'interface air-cœur, puisse se propager dans le cœur. Cet angle est lié à l'angle critique par la relation:

$$\sin \gamma = n_1 \sin (\pi/2 - \alpha_c) = n_1 \cos \alpha_c \tag{2}$$

Par combinaison des deux relations précédentes, on obtient l'ouverture numérique NA:

$$\mathrm{NA} = \arcsin (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

Si cette ouverture est faible, l'équation (3) devient

$$\mathrm{NA} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \tag{4}$$

où $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ et où $1 + n_2/n_1$ est supposé très peu différent de 2.

1.2 Mode de propagation

Par analogie avec une corde vibrante où certaines vibrations ne peuvent pas se produire, seul un certain nombre des rayons lumineux peuvent effectivement se propager, même si tous les rayons remplissent les conditions de propagation [6]. Ce résultat découle de l'application de la théorie électromagnétique de Maxwell à la propagation d'une onde lumineuse dans le cœur et le cladding, et des conditions aux limites de couplage des champs électrique et magnétique à l'interface cœur-cladding. Il en résulte que seuls les rayons pénétrant dans une fibre sous certains angles d'incidence γ_i ($i = 1...N$) déterminés, pourront se propager dans la fibre, les autres étant très rapidement amortis.

Le nombre de modes de propagation d'une fibre est donné par la relation

$$N = V^2/2 \tag{5}$$

où V est une quantité, appelée fréquence normalisée, dont la valeur est égale à

$$V = a\,k\,(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

où a est le rayon du cœur et $k = 2\pi/\lambda$, λ étant la longueur d'onde dans le vide de la vibration lumineuse. En se rapportant à l'équ. (4), l'équ. (6) devient:

$$V \approx a\,k\,n_1 \sqrt{2\Delta} \tag{7}$$

A la notion de mode de propagation est liée une autre grandeur, appelée constante de propagation. Dans l'expression

du champ électromagnétique intervient un facteur du type $e^{-\eta l}$ où l est la longueur de la fibre et η un paramètre complexe de la forme $\eta = \alpha + j\beta$, α correspondant à l'atténuation propre (indépendante du mode) et β à la constante de propagation exprimant la perte dépendant du mode de propagation. Cette constante de propagation a pour expression

$$\beta = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \cos\theta_z$$

où θ_z est l'angle que fait le rayon lumineux avec l'axe de la fibre. Elle possède une limite inférieure $\beta_c = 2\pi n_2/\lambda$, qui correspond, d'une part à la constante de propagation du cladding et, d'autre part, à l'angle critique. La condition de propagation devient alors

$$\beta > \beta_c \tag{8}$$

Si $\beta < \beta_c$ les modes peuvent se propager dans le cladding[1]).

1.3 Dispersion

De tous les modes qui peuvent se propager dans une fibre, il en est un qui suit l'axe de la fibre, appelé mode fondamental (ou axial). Tous les autres modes (liés à chaque valeur discrète γ_i) suivent un chemin optique plus long que celui du mode fondamental. De plus, la longueur du chemin optique de chaque mode sera différente. Une impulsion lumineuse émise par une source prend donc un temps différent suivant chaque mode pour parcourir une même longueur L. La conséquence en est que l'impulsion lumineuse s'élargit; on appelle cet élargissement, *dispersion modale*. Le retard pris par une impulsion pour le $p^{\text{ième}}$ mode est donné [7] en première approximation par

$$\tau_p = \frac{L}{c}(n_1 - n_2)\left(1 + \frac{p}{N}\right) \tag{9}$$

où c est la vitesse de la lumière. L'élargissement dû à la dispersion modale a pour conséquence directe de limiter la bande passante ou la capacité de transmission d'une fibre optique.

On distingue d'autre part un élargissement dû à la *dispersion intrinsèque* de la matière qui constitue le cœur de la fibre. Cette dispersion a pour expression

$$\tau_m = \frac{\lambda^2}{2}\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)\frac{\partial^2 n}{\partial\lambda^2} \tag{10}$$

où $\Delta\lambda$ est la largeur de la raie émise par la source lumineuse et $\partial^2 n/\partial\lambda^2$ la seconde dérivée de l'indice de réfraction par rapport à la longueur d'onde λ.

La *dispersion totale* d'une fibre est donnée par la relation $\tau = (\tau_p^2 + \tau_m^2)^{\frac{1}{2}}$

[1]) Comme $\Theta_z = \pi/2 - \alpha$ (fig. 3), $\beta = \frac{2\pi n_1}{\lambda}\sin\alpha$. La relation $\beta > \beta_c$ implique donc que $\frac{2\pi n_1}{\lambda}\sin\alpha > \frac{2\pi n_2}{\lambda}$, ce qui est équivalent à l'équ. (1).

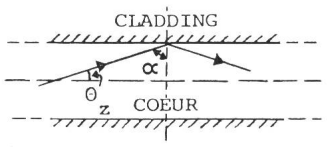

Fig. 3 Relation entre Θ_z et α
Θ_z angle entre le rayon lumineux et l'axe de la fibre
α angle d'incidence

2. Principaux mécanismes de perte

L'atténuation (ou encore l'affaiblissement) d'un signal optique (par ex. impulsion lumineuse) lors de sa propagation le long d'une fibre est causée par plusieurs processus.

2.1 Absorption par la matière

L'absorption par la matière même de la fibre est principalement due à la présence d'impuretés, telles que les traces d'ions de métaux de transition ou d'ions hydroxyles OH^-. Pour les premiers, l'absorption est liée aux transitions électroniques ou de transfert de charge issues de la couche 3d partiellement remplie [8]. Le tableau I donne des exemples de l'atténuation due à l'absorption par des traces de métaux.

L'autre cause d'absorption est liée aux rotations ou vibrations moléculaires de l'ion hydroxyle OH^- et de l'ion silicate SiO_4^{4-} tetraédrique, et de leurs bandes de combinaison [8]. Le tableau II en donne les longueurs d'onde. Par exemple, 2,5 ppm de trace en ions OH^- entraîne une perte de 3 dB/km; 1,25 ppm, 1 dB/km et 0,2 ppm, 0,3 dB/km, mesurée à 945 nm [9].

2.2 Diffusion de la matière

La *diffusion Rayleigh* [12] est causée par les fluctuations thermiques de la composition de la matière ou par des séparations en différentes phases, dont l'étendue est faible par rapport à la longueur d'onde λ. Elle est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la longueur d'onde (par ex.: 0,85 dB/km à 1000 nm).

Si les inhomogénéités de la matière sont comparables en grandeur à la longueur d'onde, on a la *diffusion de Mie* [13].

Sous *diffusions stimulées*, on classe les diffusions Raman et de Brillouin [14]. Elles sont non linéaires et ont pour effet de limiter la puissance lumineuse injectée. Dans certaines applications on utilise la diffusion Raman pour induire par injection d'une forte puissance lumineuse, l'excitation des bandes de Stokes ou anti-Stokes (bien connues en spectroscopie) par pompage optique. L'intérêt de cet effet est l'apparition de plusieurs raies d'émission de longueur d'onde différente, pouvant être ensuite dirigées dans un guide d'onde propre à chaque longueur d'onde.

2.3 Diffusion propre au guide d'onde

On entend par cette diffusion celle qui est due aux variations géométriques des dimensions du cœur par rapport à l'axe longitudinal d'une fibre. Elle provoque un transfert d'énergie entre les modes de propagation ou/et entre un mode de propagation et le champ électromagnétique.

2.4 Microcourbures

Des microcourbures peuvent apparaître tant lors du processus de fabrication que lors des manipulations auxquelles une fibre est sujette ensuite [6]. De telles microcourbures entraînent un passage du rayonnement lumineux dans le cladding, d'où une perte et une diminution du nombre de modes de propagation guidés. Dans ce cas, l'atténuation varie de façon exponentielle.

De la même manière, une mauvaise composition ou conception du cladding entraîne une diffusion de la puissance lumineuse du cœur vers le cladding.

En conclusion on peut dire que la diffusion Raleigh et l'absorption intrinsèque de la matière utilisée définissent la

Atténuation produite par 1 ppm de métaux de transition dans la silice fondue, à 850 nm [5; 6; 10; 11] Tableau I

Elément	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	V
Atténuation en dB/km	610 à 1300	20 à 60	50 à 130	20–24	27–30	10–22	1050 à 2500
Longueur d'onde de la bande d'absorption en nm	650 (Cr^{3+})		300 (Fe^{3+}) ≈ 1000 (Fe^{2+})			200 (Cu^{+}) 800 (Cu^{2+})	

Longueurs d'ondes de vibrations moléculaires (nm) Tableau II

	Fondamental	Harmoniques
OH^-	2750	1380 945 720 600
SiO_4^{4-}	12500	–
	Bandes de combinaison	
OH^- + SiO_4^{4-}	2200 1900 1246	1140 880 820

valeur limite de l'atténuation pouvant être atteinte. Selon les calculs de *W. Heitmann* [15], l'atténuation intrinsèque de la silice pure serait de 1,9 dB/km à 850 nm et de 0,93 dB/km à 1050 nm. Pour de la silice dopée à l'oxyde de phosphore, ces valeurs deviennent respectivement 1,42 et 0,65 dB/km. Les valeurs expérimentales rapportées dans la littérature sont souvent très voisines de ces résultats théoriques.

3. Types de fibres optiques

3.1 Les fibres monomodes

La théorie montre que, si l'on veut limiter la propagation au seul mode fondamental (mode axial), la fréquence normalisée V (équ. 6) doit être inférieure à ou voisin de V_0, V_0 étant égal à 2.405. Cette condition tient compte tant de la distribution d'intensité de ce mode que de la dispersion du guide d'onde. Elle implique que le diamètre du cœur d_c réponde à l'équation

$$d_c = d_{c0} = \frac{2.405\,\lambda}{\pi}\,(n_1^2 - n_2^2)^{-\frac{1}{2}} \qquad (11)$$

Pour une longueur d'onde $\lambda = 830$ nm et pour un cœur en silice pure ($n_1 = 1.458$), on obtient $d_{c0} = 10$ µm pour $\Delta = 0{,}1\,\%$ et 3 µm pour $\Delta = 1\,\%$. Si d_c est trop grand, les propriétés de guidage deviennent faibles et elles s'accompagnent d'une sensibilité élevée de la fibre aux courbures ou microcourbures. Pour un bon compromis entre les problèmes de guidage et de couplage, on pourra choisir Δ compris entre 0,2 et 0,7 %, soit $3{,}5 < d_c < 7$ µm.

Dans une fibre monomode, une quantité appréciable de la puissance lumineuse se propage dans le cladding. Pour limiter les pertes dues à cette propagation, il faut que le cladding soit de la même qualité que le cœur, i.e. fait de la même matière. On a montré que si s est la pénétration du champ électromagnétique dans le cladding, le rapport minimum s/a est égal à 8 : 1 afin de garder la perte inférieure à 1 dB/km [16]. On choisit d_c et Δ de telle façon que V diminue de 2,4 (à 0,85 µm) à 1,8 (à 1,1 µm).

Un avantage d'une fibre monomode est que ses propriétés se modifient peu en fonction des variations du diamètre du cœur. On peut donc observer des tolérances moyennes à la fabrication. Des déviations dans la concentricité ou l'ovalité du cœur sont aussi tolérables (par ex. pour $\Delta < 1\,\%$, l'élargissement de l'impulsion est inférieure à 0,1 ns/km pour une ovalité de 10 %).

Un autre avantage des fibres monomodes est que, ne propageant par définition qu'un seul mode, elles sont exemptes de dispersion modale, ce qui leur confère une bande passante bien supérieure à celle des autres fibres (de l'ordre du GHz). Dans ce cas, la bande passante (ou la dispersion) ne dépend que de la largeur $\Delta\lambda$ de la raie d'émission de la source lumineuse utilisée, et de la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde $\partial^2 n/\partial\lambda^2$ (équ. 10). La dispersion est de 3,6 ns/km pour une diode électroluminescente ayant $\Delta\lambda = 36$ nm, et de 0,2 ns/km pour une diode laser ayant $\Delta\lambda = 2$ nm [17].

Etant donné que le diamètre du cœur dans une fibre monomode est très petit, il se pose le problème de la jonction de telles fibres ou de leur couplage à la source lumineuse (injection) et au détecteur. Remarquons enfin que les fibres monomodes sont généralement du type «saut d'indice», quoiqu'une diffusion des traces de dopants dans le cladding puisse se produire lors de la fabrication qui les rapproche du type «gradient d'indice».

3.2 Les fibres multimodes

a) Les fibres à saut d'indice

L'indice suivant une section de fibre montre une discontinuité à l'interface cœur-cladding (fig. 4). L'indice du cœur, supérieur à celui du cladding, reste constant sur son diamètre. Ce dernier peut varier entre 25 µm et quelques centaines de µm. Il est souvent de l'ordre de 50 à 70 µm.

Soit une fibre ayant un diamètre de cœur égal à 50 µm d'indice $n_1 = 1{,}478$, Δ étant égal à 1,35 % et λ à 850 nm.

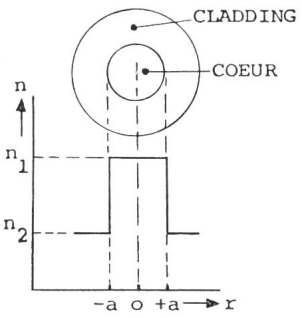

Fig. 4 Indice de réfraction d'une fibre à saut d'indice

L'ouverture numérique de cette fibre est égale à 0,243 rad ($\approx 14^0$). Pour connaître le nombre de modes de propagation, il faut calculer la fréquence normalisée V, soit $V = 44{,}781$, d'où le nombre de modes $N = V^2/2 \approx 1003$.

L'élargissement d'une impulsion lumineuse dû à la dispersion modale (équ. 9) est donné par la différence de temps entre le mode fondamental ($p = 0$) et le 1003ème mode, soit

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{L}{c}\,(n_1 - n_2) = \frac{L}{c}\,n_1\,\Delta \qquad (12)$$

Pour l'exemple précité, on obtient pour une longueur d'un km $\delta \approx 66{,}5$ ns/km.

La dispersion modale est donc une limite très restrictive à la bande passante d'une fibre à saut d'indice.

b) Les fibres à gradient d'indice

Dans une fibre à gradient d'indice, l'indice du cœur varie en fonction du rayon selon une loi presque quadratique (fig. 5). Pour $|r| \leq a$ et $\Delta = (n_{\max} - n_2)/n_{\max}$

$$n_r \approx n_{\max}\left[1 - \Delta\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}\right] \qquad (13)$$

où l'exposant α est voisin de 2. Si $|r| > a$, on a $n_r = n_2$.

Dans une telle fibre, les rayons lumineux ne se propagent plus selon des trajectoires en zigzag, mais selon des trajectoires courbes. Plus le rayon lumineux s'éloigne de la fibre, plus sa courbure est prononcée. Il se produit un effet d'auto-focalisation. De plus, comme n_r diminue d'autant plus que r augmente, la vitesse de propagation (c/n, c étant la vitesse de la lumière dans le vide) augmente avec r. Cette variation de la vitesse a pour effet d'égaliser le temps de propagation du rayon lumineux selon les différentes trajectoires. De ce fait, la dispersion modale de ces fibres est faible, d'où une bande passante nettement plus grande que celle des fibres à saut d'indice.

Pour les fibres à gradient d'indice, les expressions caractérisant leurs propriétés sont quelque peu modifiées. Ainsi, le nombre de modes de propagation est donné par

$$N = c_m\,(n_1\,k\,a)^2\,\Delta \qquad (14)$$

avec $c_m = \alpha/(\alpha + 2)$, α étant l'exposant de l'équ. (13). Si $\alpha = 2$, $N = (n_1\,k\,a)^2\,\Delta/2$, ce qui donne pour les mêmes caractéristiques de fibre données dans l'exemple d'une fibre à saut d'indice $N = 503$ modes de propagation.

La dispersion modale est donnée par

$$\delta = \frac{L}{2c}\,n_1\,\Delta^2 \qquad (15)$$

En y reportant les mêmes paramètres que précédemment, il vient $\delta \approx 0{,}45$ ns/km.

On constate donc que, les paramètres définissant la fibre étant égaux, le nombre de modes de propagation est plus faible dans une fibre à gradient d'indice qu'à saut d'indice et que la dispersion modale est très nettement plus faible, ce qui permet d'augmenter sensiblement la capacité de transmission de la fibre.

4. Procédés de fabrication

4.1 La méthode du double creuset [18; 19; 20]

Le premier pas de fabrication consiste à obtenir un verre composite de haute pureté, tel que des verres à base de silice, d'oxydes de calcium et de sodium ou des verres en borosilicate

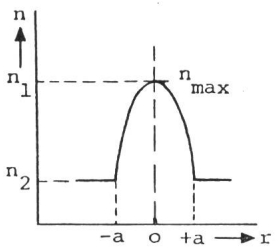

Fig. 5 Indice de réfraction d'une fibre à gradient

de sodium. Pour ce faire, les matières premières (carbonates, oxydes ...) sont mélangées dans des proportions connues de façon homogène. Lorsque le mélange est prêt, il est fondu dans un creuset de platine ou de platine rhodié très pur, à une température de l'ordre de 1000 °C. Le mélange fondu est homogénéisé, traité par barbotage de gaz oxydants ou réducteurs selon les cas.

Lorsque le traitement est terminé, on étire un barreau de verre du bain fondu. Les barreaux étirés sont ensuite traités en surface par un mélange d'acides. Une fois nettoyés, ils sont placés au-dessus du système d'étirage. Ce système comporte deux creusets concentriques en platine ou en silice, percés d'un trou ou filière (fig. 6). Le corps de chauffage peut être un four électrique ou un four à induction à haute fréquence. Dans le premier cas, tout l'ensemble est chauffé, en particulier les creusets en platine. A la température d'étirage, le platine contenant toujours quelques impuretés (si minimes soient-elles), ces impuretés diffusent dans le verre fondu, ce qui entraîne pour la fibre étirée un accroissement de l'atténuation. On peut y remédier en gardant le four sous atmosphère contrôlée d'une part et en introduisant dans le mélange un gaz ou un corps oxydant ou réducteur suivant les cas.

Dans le second type de four, c'est seulement la matière fondue qui est chauffée; en effet, à partir d'une certaine température, le verre devient conducteur électrique. Le démarrage du chauffage nécessite un inducteur à base de graphite. Dans ce cas, les parois des creusets sont des zones «froides», et de ce fait, la diffusion des impuretés est très réduite.

Sur la figure 6, les barreaux de verre descendent automatiquement dans chacun des creusets afin de garder les niveaux constants. Ceci est nécessaire à l'obtention d'une fibre de diamètre constant et à une bonne concentricité cœur-cladding.

Cette méthode permet de fabriquer des fibres monomodes, multimodes à saut ou à gradient d'indice. Ces dernières fibres

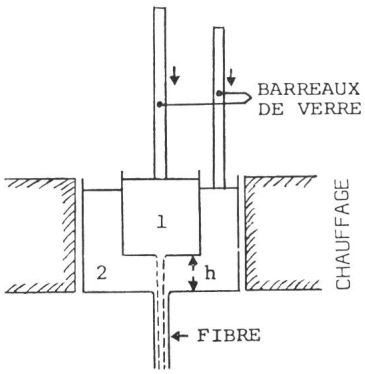

Fig. 6 La méthode du double creuset
1 verre pour le cœur
2 verre pour le cladding

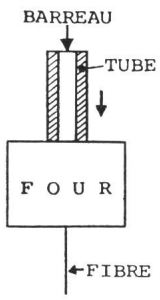

Fig. 7 La méthode du tube et du barreau

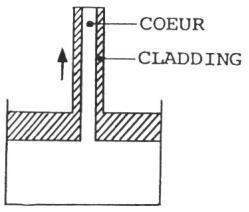

Fig. 8 La méthode d'étirage d'un barreau composite à partir d'un bain à deux qualités de verre

sont obtenues par diffusion d'un dopant du verre du cladding dans le verre du cœur, soit des ions de potassium, de thallium ou de sodium. La diffusion du dopant dépend en particulier de la hauteur h entre les bases des creusets, des diamètres des filières, de la vitesse d'étirage, et de la composition des verres du cœur et du cladding. La méthode permet d'étirer une longueur de fibre allant jusqu'à 10 km. L'atténuation minimale atteinte est de l'ordre de 10 dB/km. La reproductibilité à la fabrication est moyenne, car elle repose sur de nombreux paramètres, tels que l'homogénéité, la composition du mélange, la température et la vitesse d'étirage qui doivent être contrôlées rigoureusement.

4.2 La méthode du tube et du barreau

Avec cette méthode, un barreau de verre composite (ou de silice) d'indice n_1 est inséré à l'intérieur d'un tube de verre de composition différente, d'indice n_2 ($n_2 < n_1$). Le diamètre extérieur du premier correspondant étroitement au diamètre intérieur du second (fig. 7). L'ensemble est étiré en une fibre par passage au travers d'un four, les diamètres du cœur et du cladding reproduisant ceux du barreau et du tube.

L'inconvénient majeur de cette méthode est l'apparition de microdéfauts (bulles, pailles, etc.) à l'interface cœur-cladding. De ce fait, cette méthode est assez peu utilisée, car les fibres obtenues ont une atténuation élevée. Un procédé analogue consiste à étirer un barreau composite à partir d'un bain de deux verres d'indices différents (fig. 8). Ce barreau, qui comporte déjà le cœur et le cladding, est ensuite étiré en une fibre par passage à travers un four.

4.3 La méthode de déposition par réaction chimique, contrôlée en phase vapeur (CVR)

– *Fabrication de la préforme*

La déposition chimique de matière à partir de phases gazeuses est bien connue des fabricants de composants électroniques. Elle a été modifiée pour être appliquée à la déposition de granules cristallins ou amorphes de silice (quartz) à l'extérieur ou à l'intérieur d'un support, qui peut être respectivement un barreau ou un tube de silice de très haute pureté [20; 21; 22]. Dans les deux cas, il est nécessaire de réaliser préalablement le mélange des phases gazeuses. Pour ce faire, un courant d'oxygène circule dans plusieurs barboteurs avec des débits variables (fig. 9). Ces barboteurs contiennent chacun un produit chimique (halogénure liquide ou gazeux) ayant une tension de vapeur élevée à la température ordinaire, tel que le tétrachlorure de silicium, le tétrachlorure de germanium ou le tribromure de bore. Le courant d'oxygène par passage au travers de ces barboteurs se charge en vapeur du produit qu'il traverse, la quantité dépendant du débit d'oxygène.

A la sortie du banc de mélange, on a un courant gazeux comportant de la vapeur de $SiCl_4$, des dopants et de l'oxygène. Ce courant gazeux est envoyé soit à travers la flamme d'un chalumeau oxy-hydrogène (ou oxy-propane), soit par un tube de silice localement chauffé (fig. 10, 11). Sous l'action de la chaleur, les halogénures se décomposent et réagissent avec l'oxygène pour former des oxydes. Les réactions sont les suivantes:

$$Si\,Cl_4 + O_2 \rightarrow Si\,O_2 \downarrow + 2\,Cl_2 \uparrow$$
$$Ge\,Cl_4 + O_2 \rightarrow Ge\,O_2 \downarrow + 2\,Cl_2 \uparrow$$
$$4\,B\,Br_3 + 3\,O_2 \rightarrow 2\,B\,O_3 \downarrow + 6\,Br_2 \uparrow$$

Un mélange d'oxydes de composition connue se dépose à la surface extérieure resp. intérieure du support. Sous l'action de la chaleur, ces oxydes fusionnent pour former une couche de silice dopée par l'inclusion d'autres oxydes. Les dopants les plus utilisés sont l'oxyde de germanium (GeO_2) et le pentoxyde de phosphore (P_2O_5) qui augmentent l'indice de réfraction de

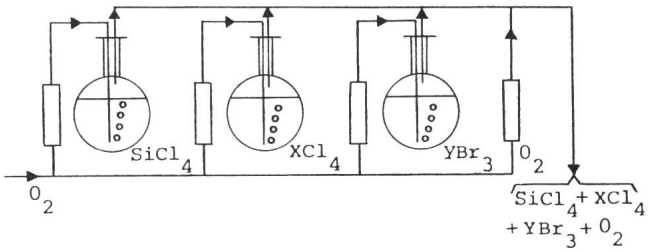

Fig. 9 Procédé de mélange des phases gazeuses

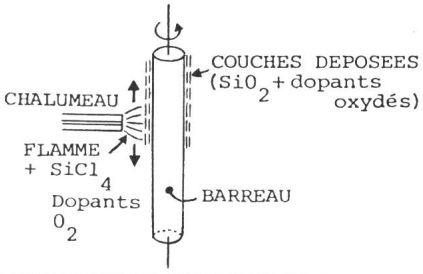

Fig. 10 Déposition des dopants dans la flamme d'un chalumeau

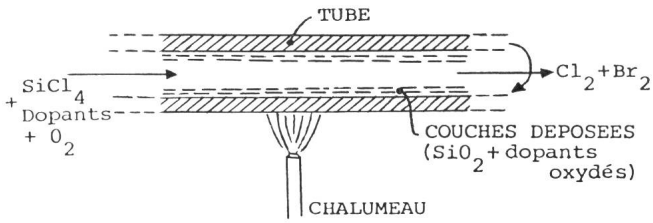

Fig. 11 Déposition des dopants dans un tube chauffé localement

la silice, ainsi que l'oxyde de bore (B_2O_3) et le fluorure de silicium (SiF_4) qui diminuent l'indice de réfraction.

Lors du processus de déposition, plusieurs couches sont déposées successivement en balayant le support (en rotation) par le chalumeau. Si l'on veut obtenir à l'étirage une fibre à saut d'indice, on gardera les débits d'oxygène constants lors de ces passages successifs. Pour une fibre à gradient d'indice, le débit d'oxygène, constant pour $SiCl_4$, sera varié pour les autres, si bien que l'on peut soit augmenter soit diminuer la concentration du dopant pour obtenir la variation de l'indice de réfraction souhaitée. Les couches déposées formeront le cœur de la fibre, et le tube support correspondra au cladding.

Lorsque toutes les couches sont déposées pour obtenir l'épaisseur voulue, on procède au rétrécissement du tube pour obtenir un barreau. Le tube et les couches déposées sont portés à une très haute température (de l'ordre de 1900 °C), alors qu'une légère surpression d'oxygène est maintenue à l'intérieur du tube afin qu'il garde sa géométrie [23]. A cette température, les tensions superficielles sont telles que le tube se resserre de lui-même jusqu'à devenir un barreau plein appelé préforme.

Cette préforme est ensuite introduite dans un four pour être étirée en une fibre dont le rapport de diamètres cœur/cladding reproduira celui de la préforme.

Pour la déposition des dopants on peut remplacer le chalumeau oxy-hydrogène par une cavité microonde. Dans ce cas, le tube support est mis sous vide de quelques mbar avant l'introduction du mélange des gaz. Lorsque ce mélange parvient au niveau de la cavité, le champ électromagnétique haute-fréquence donne naissance à un plasma, provenant de la décomposition des produits par ionisation. Là encore, il y a déposition d'oxydes, qui sont ensuite fondus pour former le verre dopé. L'emploi d'une cavité résonnante évite la rotation du tube support et permet de déposer des couches plus minces [24].

Dans d'autres réalisations, le four à induction électrique est remplacé pour l'étirage par un laser continu à gaz carbonique. L'emploi d'un tel laser permettrait d'obtenir une meilleure précision sur le diamètre extérieur de la fibre [25].

– *Quelques aspects de la méthode CVR*

Les dopants ajoutés à la silice ont pour premier effet de diminuer la température à laquelle se fera la déposition; ils abaissent la viscosité de la silice [26]. Ce fait peut devenir négatif lors du rétrécissement si la concentration en dopant est trop élevée. Pour chaque dopant, il existe une limite de concentration supérieure à ne pas dépasser. Pour P_2O_5 par ex., la limite en concentration molaire est de l'ordre de 25 % [23]. Ce dopant est d'ailleurs hygroscopique, si bien qu'il a l'avantage de diminuer de façon non-négligeable l'absorption due aux ions hydroxyles OH^- [26].

Très souvent, avant la déposition des couches qui formeront le cœur, on dépose quelques couches préliminaires de silice pure ou dopée à l'oxyde de bore. Elles ont pour but d'amoindrir ou d'annuler la diffusion éventuelle d'impuretés du tube support vers le cœur [27; 28].

L'étape de fabrication de la préforme la plus importante pour obtenir une bonne fibre est le rétrécissement. De lui dépend la concentricité et l'ellipticité du cœur et du cladding d'une fibre.

Dans bien des cas, la mesure expérimentale de la variation de l'indice de réfraction en fonction du rayon montre que celle-ci présente un creux («dip») au centre. Ce creux dans le profil d'indice a un effet néfaste sur la bande passante et la capacité de transmission [33; 34; 35]. Il provient de la volatilisation du dopant de la dernière couche déposée [29]. Plusieurs remèdes sont utilisés pour le diminuer [30; 31; 32]: augmenter l'épaisseur totale déposée pour la dernière couche, augmenter la teneur du composant le plus volatil (souvent le dopant) dans la couche finale, substituer ou ajouter un composant moins volatil ou injecter de l'oxygène en plus de la vapeur du gaz dopant.

Enfin, lors de l'étirage, on applique sur la fibre un revêtement de protection, appelé microjaquette.

La méthode CVR permet de fabriquer différents types de fibres, dont la composition est donnée dans le tableau III.

4.4 Fibres à revêtement plastique

Les fibres à revêtement plastique («plastic clad silica fiber») sont apparues assez récemment et ont pour but de remplacer les faisceaux de fibres («bundles»), cela grâce à leur ouverture numérique assez élevée. Ces fibres sont en général du type à saut d'indice. Leur procédé de fabrication est le suivant:

Un barreau de silice de très haute pureté est étiré en une fibre de diamètre de l'ordre d'une centaine de micron qui en constitue le cœur. La fibre est ensuite recouverte d'une enveloppe en résine silicone ou en polymère fluorocarboné, de diamètre de l'ordre de quelques centaines de μm [36].

5. Choix des fibres optiques dans un système de transmissions

Il existe déjà de nombreuses lignes de transmission par fibres optiques (assemblées dans des câbles) dans les domaines téléphonie, transmission de données et liaisons TV. Le tableau IV en donne quelques exemples [37...47].

Le choix du type de fibre optique est tout d'abord défini par la longueur de la liaison. Pour une longue distance, les fibres devront présenter une très faible atténuation et posséder

Composition des fibres fabriquées par la méthode CVR — Tableau III

Cœur Cladding Extérieur	$SiO_2 + B_2O_3 + GeO_2$*) $SiO_2 + B_2O_3$ SiO_2	$SiO_2 + GeO_2$*) + P_2O_5**) $SiO_2 + P_2O_5$ ou B_2O_3 SiO_2	$SiO_2 + P_2O_5$*) SiO_2 ou $SiO_2 + B_2O_3$ SiO_2
Cœur Cladding Extérieur	$SiO_2 + B_2O_3$*) $SiO_2 + B_2O_3$ SiO_2	SiO_2 $SiO_2 + B_2O_3$ SiO_2	SiO_2 (+ P_2O_5) *) $SiO_2 + SiF_4$ SiO_2

*) composant dont la concentration peut être variée pour obtenir le profil d'indice voulu.

**) l'addition d'une faible concentration en P_2O_5 diminue la viscosité du mélange $SiO_2 + GeO_2$, et aide à diminuer la formation de bulles lors de la déposition [22; 25].

Quelques exemples de lignes de transmission par fibres optiques Tableau IV

Type de liaison	Longueur installée (km)	Lieu d'installation	Capacité de transmission
Téléphonique (digitale et analogique, signaux Vidéo)	2,6 10,9	Chicago Atlanta USA	44,7 Mbit/s
Téléphonique	14 7	Entre Martlesham et Ipswich GB	8 Mbit/s 140 Mbit/s
TV couleur Transmission analogique et digitale	1	Painted Post (N.Y.) USA	100 Mbit/s (digitale) et 8 MHz/km (analogique)
Transmission de données	2	San Diego (entre station de relais satellite et centre traitement de données à Fort Meade) USA	20 Mbit/s
Téléphonique	9	Entre Hitchin et Stevenage GB	140 Mbit/s
Vidéo PAL-CTV, transmission analogique et digitale	2,1	Munich RFA	80 Mbit/s (digitale)

une capacité de transmission élevée ou très élevée (i.e. une dispersion faible resp. très faible) et une ouverture numérique la plus élevée possible. A ces exigences répondent les fibres monomodes ou multimodes à gradient d'indice de bonne qualité.

Les fibres à gradient d'indice de qualité moyenne ou à saut d'indice seront de préférence utilisées sur des liaisons à moyenne distance. Dans ce cas, l'atténuation est très faible et la capacité de transmission peut être élevée ou moyenne.

Pour une liaison à courte distance, on emploiera des fibres à saut d'indice ayant une atténuation moyenne et une capacité de transmission élevée ou faible.

Bibliographie

[1] Topical Meeting on Optical Fiber Transmission II, February 22...24, 1977, Williamsburg/Virginia.

[2] Third European Conference on Optical Communication. Conference Proceedings. Sept. 14...16, 1977; Techn. Universität München. NTG-Fachberichte 59(1977).

[3] *W.B. Bielawski:* Low-loss optical waveguides: current status. Electro-Optical Systems Design –(1973)4, p. 22...28.

[4] *C.P. Sandbank:* Les télécommunications sur fibres optiques. Rev. Télécommunications 50(1975)1, p. 21...28.

[5] *M.M. Ramsay* e.a.: Propagation dans les guides d'ondes à fibre optique. Rev. Télécommunications 50(1975)3, p. 176...184.

[6] *D. Marcuse:* Optical fibres for communications. Radio and Electronic Engineer 43(1973)11, p. 655...664.

[7] *Y. Toriyama* a.o.: Multimode fiber cable for optical transmission. Fujikura Technical Rev. –(1974)–, p. 14...25.

[8] *J. Wong* and *C.A. Angell:* Glass: structure by spectroscopy. New York/Basel, Marcel Dekker Inc., 1976.

[9] *R. Yamanchi* a.o.: Coloration and its reduction in phosphorus-doped low-loss optical fibres. Electronics Letters 13(1977)1, S. 461...462.

[10] *P.W. Black:* Fabrication of optical fiber waveguides. Electrical Communications 51(1976)1, p. 4...11.

[11] *P.C. Schultz:* Optical absorption of the transition elements in vitreous silica. J. American Ceramic Society 57(1974)7, p. 309...313.

[12] *K.J. Beales* a.o.: Materials and fibers for optical transmission systems. Post Office Electrical Engineering J. 67(1974/75)–, p. 80...87.

[13] *E.G. Rawson:* Calculation of Mie scattering by spherical particles in low-loss glasses for optical waveguides. Appl. Optics 10(1971)12, p. 2778...2779.

[14] *J. Schroeder* a.o.: Rayleigh and Brillouin scattering in K_2O-SiO_2 glasses. J. American Ceramic Society 56(1973)10, p. 510...514.

[15] *W. Heitmann:* Intrinsic attenuation in pure and doped silica for fibre optical waveguides. NTZ 30(1977)6, p. 503...506.

[16] *P. Kaiser* a.o.: Single-mode fibers with different B_2O_3-SiO_2 compositions. Topical Meeting on Optical Fiber Transmission II, February 22...24, 1977, Williamsburg/Virginia; p. TuD3–1...TuD3–4.

[17] *D. Gloge:* Optical fibers for communication. Appl. Optics 13(1974)2, p. 249 à 254.

[18] *H.M.J.M. van Ass* u.a.: Die Herstellung von Glasfasern für optische Kommunikation. Philips Techn. Rdsch. 36(1976)7, S. 195...203.

[19] *K.J. Beales* a.o.: Preparation of sodium borosilicate glass fibre for optical communication. Proc. IEE 123(1976)6, p. 591...596.

[20] *W.G. French, J.B. MacChesney* and *A.D. Pearson:* Glass fibers for optical communications. Annual Review of Materials Science 5(1975)–, p. 373...393.

[21] *M.T. Rigterink:* Better glass fibers for optical transmission. Bell Laboratories Record 55(1975)9, p. 341...345.

[22] *W.G. French, G.W. Tasker* and *J.R. Simpson:* Graded index fiber wave guides with borosilicate composition: Fabrication techniques. Appl. Optics 15(1976)7, p. 1803...1807.

[23] *C.R. Hammond:* The production of phosphosilicate fibres. Electro-Optics/Laser International '76 UK, Brighton, march 1976. Conference Proceedings –(1976), p. 73...76.

[24] *P. Geittner, D. Küppers* and *M. Lydtin:* Low-loss optical fibers prepared by plasma-activated chemical vapor deposition (CVD). Appl. Physics Letters 28(1976)11, p. 645...646.

[25] *U.C. Paek:* Laser drawing of optical fibers. Appl. Optics 13(1974)6, p. 1383 à 1386.

[26] *D.N. Payne* and *W.A. Gambling:* Preparation of water-free silica-based optical-fibre waveguide. Electronics Letters 10(1974)16, p. 335...336.

[27] *J.B. MacChesney, P.B. O'Connor* and *H.M. Presby:* A new technique for the preparation of low-loss and graded index optical fibers. Proc. IEEE 62(1974)9, p. 1280...1281.

[28] *G.W. Tasker* and *W.G. French:* Low-loss optical waveguides with pure fused SiO_2 cores. Proc. IEEE 62(1974)9, p. 1281...1282.

[29] *P.F. Checcacci, R. Falciani* and *A.M. Scheggi:* Influence of a central depression on the dispersion characteristics of a graded-index profile. Electronics Letters 13(1977)13, p. 378...379.

[30] *K. Behm:* Dispersion measurement of CVD-fabricated fibers with a refractive index dip on the fiber axis. Third European Conference on Optical Communication. Conference Proceedings. Sept. 14...16, 1977, Techn. Universität München. NTG-Fachberichte 59(1977), p. 28...30.

[31] *T. Akamatsu, K. Okamara* and *Y. Ueda:* Fabrication of long length fibers by improved CVD method. Topical Meeting on Optical Fiber Transmission II, February 22...24, 1977, Williamsburg/Virginia. TuC3–1...TuC3–4.

[32] *T. Akamatsu, K. Okamara* and *Y. Ueda:* Fabrication of graded-index fibers without an index dip by chemical vapor deposition method. Appl. Physics Letters 31(1977)8, p. 515...517.

[33] *E. Khular* a.o.: Effect of the refractive index dip on the propagation characteristics of step index and graded index fibers. Optics Communications 23(1977)2, p. 263...267.

[34] *L.G. Cohen* a.o.: Profile dispersion effects on transmission bandwidth in graded index optical fibers. IEEE J. Quantum Electronics 14(1978)1, p. 37...41.

[35] *L. Jacomme:* Effects of an abrupt central dip in CVD fabricated fibers. Wave Electronics 3(1978)2, p. 169...176.

[36] *S. Tanaka* a.o.: Silicone-clad fused silica-core fibre. Electronics Letters 11(1975)7, p. 153...154.

[37] *D.N. Williams:* Fiber optics for data transmission. Instrumentation Technology 23(1976)9, p. 61...66.

[38] *A.K. Chakravarti:* Fiber communication systems. An appropriate application analysis. Electrical Information and Planning 4(1976)–, p. 119...134.

[39] *J.D. Montgomery:* Worldwide business opportunities in fiber optic communications. Fiber and Integrated Optics 1(1977)1, p. 101...113.

[40] *R.A. Greenwell:* Fiber optics cost models for the A-7 aircraft. Fiber and Integrated Optics 1(1977)2, p. 197...225.

[41] *S. Shimada, M. Koyama* and *T. Kimura:* Progress in optical fiber transmission technology. Japan Telecommunication Rev. 19(1977)2, p. 86...96.

[42] *P.J. Howard* and *D.R. Hill:* A 140 Mbit/s optical-fibre field demonstration system. Telecommunication J. 44(1977)12, p. 592...595.

[43] *J.E. Goell* and *C.K. Kao:* System considerations and design. Radio Science 12(1977)4, p. 499...509.

[44] *T. Ito* and *S. Machida:* Optical transmission experiments at 400 MB. Trans. Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan E60(1977)3, p. 123...130.

[45] *E.H. Hara:* Conceptual design of a switched television-distribution system using optical fiber waveguides. IEEE Trans. CATV 2(1977)3, p. 120...130.

[46] *W.S. Boyle:* Light-wave communications. Sci. Am. 237(1977)2, p. 40...48.

[47] *D.J. Brace* and *I.A. Ravenscroft:* Optical fiber transmission systems: The 8–448 Mbit/s feasibility trial. Post Office Electrical Engineering J. 70(1977)3, p. 146...153.

Adresse des auteurs

H. Berthou et *P. Benoît*, Cabloptic SA, 2016 Cortaillod.