

LES LASERS

Marc FERRETTI

LES FIBRES OPTIQUES

LE mécanisme par lequel la lumière est guidée dans une fibre transparente repose sur le phénomène de réflexion totale : un rayon lumineux se propageant dans un milieu d'indice de réfraction élevé (un verre par exemple) est totalement réfléchi à la surface de séparation avec un milieu moins réfringent (l'air par exemple)

si son incidence est suffisamment rasante.

On définit ainsi un angle limite au-delà duquel tous les rayons sont réfléchis.

Un conducteur optique sera alors constitué d'un cylindre de verre ou de tout autre matériau transparent : un rayon injecté dans le conducteur avec une incidence suffisamment grande sera réflé-

chi une première fois, renvoyée du côté opposé puis réfléchi une seconde fois, et ainsi de suite. Chacune des réflexions est totale : il n'y a pas, en principe, de perte d'intensité lumineuse dans la fibre, sauf si la surface de la fibre n'est pas optiquement parfaite.

LA REFLEXION TOTALE

Il est commode, pour chaque substance transparente, d'introduire un indice désigné par la lettre n . Cet indice est égal au rapport de la célérité c de la lumière dans le vide (de l'ordre de 300 000 km/s) et à la vitesse v de la lumière



Photo 1. - T.V. à fibres optiques : les signaux vidéo modulent une diode électro-luminescente ; celle-ci est couplée, à un faisceau de fibres optiques de plusieurs centaines de mètres de longueur. A l'autre extrémité se trouve un détecteur relié au poste de télévision (photo Corning Glass Works).

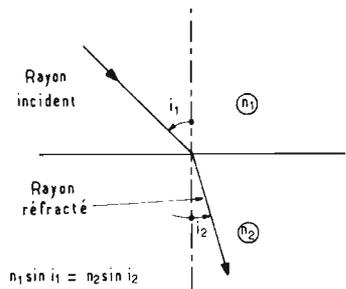


Fig. 1. - Réfraction d'un rayon lumineux.

dans la substance elle-même. Comme cette dernière vitesse v dépend de la longueur d'onde, il en est de même de n . Pour la lumière jaune, l'indice n vaut sensiblement 1,33 pour l'eau et 1,5 pour le verre.

Si la lumière passe d'un milieu d'indice n_1 (angle d'incidence i_1) dans un milieu d'indice n_2 (angle de réfraction : i_2) on a la relation (fig. 1) :

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

Etant donné deux milieux transparents d'indices n_1 et n_2 et un rayon tombant sur l'interface entre ces milieux avec un angle i_1 , on observera, éventuellement, la présence d'un rayon réfracté ; dans ce cas, l'angle de réfraction i_2 est fourni par la relation précédente. D'après la définition des fonctions trigonométriques, il faut, évidemment, que l'expression :

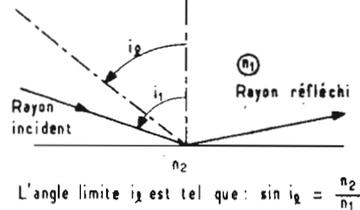
$$\frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

soit inférieure à l'unité pour que l'on puisse écrire :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

En effet, le sinus d'un angle est toujours plus petit, ou égal, à l'unité. Si l'expression $n_1/n_2 \sin i_1$ est supérieure à l'unité, on ne peut pas trouver d'angle i_2 satisfaisant à la loi

Fig. 2. - Réflexion totale l'angle limite i_c est tel que $\sin i_c = n_2/n_1$.



L'angle limite i_c est tel que : $\sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$

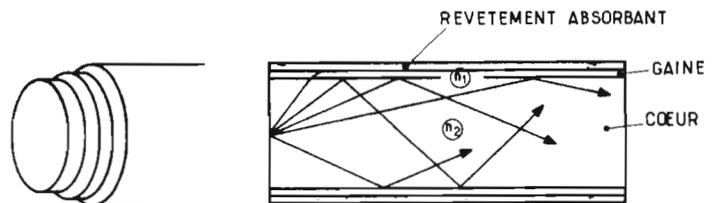


Fig. 3. - Un rayon optique se propage dans une fibre optique par une succession de réflexions totales.

de réfraction, ce qui, physiquement, s'explique par l'absence de rayon réfracté : donc lorsque l'angle d'incidence est supérieur à un angle limite i_n tel que :

$$\sin i_n = \frac{n_2}{n_1}$$

le rayon incident subit une réflexion, au lieu d'être réfracté (fig. 2).

La réflexion totale est exploitée dans les fibres optiques ; celles-ci se composent généralement d'une partie centrale (le « cœur » ou « noyau ») entourée d'une gaine d'indice de réfraction plus faible. Un revêtement absorbant enveloppe l'ensemble (fig. 3).

Les fibres optiques se classent en deux grandes classes : les fibres monomodes dans lesquelles le diamètre du cœur est faible, de l'ordre de la longueur d'onde ; et les fibres multimodes où le diamètre du cœur est grand devant la longueur d'onde.

La propagation de la lumière, dans les fibres multimodes est expliquée par les lois de l'optique géométrique et le phénomène de réflexions totales successives.

Ce n'est pas le cas pour les fibres monomodes, pour lesquelles la propagation est décrite mathématiquement par les équations dites de Maxwell relatives à la propagation des ondes électromagnétiques (fig. 4).

LES FIBRES OPTIQUES

A côté de ces deux grandes classes de fibres optiques, sont apparues divers types de fibres qui en améliorent les performances ou encore rendent plus aisées les techniques de fabrication.

TABLEAU 1

L'indice des milieux transparents dépend de la longueur d'onde. Considérons deux longueurs d'ondes « limites » du spectre optique, celles correspondant respectivement aux raies rouge et bleu-vert de l'hydrogène (dénommées raies C et F), ainsi que la raie jaune (« raie d ») de l'hélium, pour la longueur d'onde intermédiaire. Les trois longueurs d'onde sont :

C, rouge, hydrogène : 0,65628 angström

d, jaune, hélium : 0,58756 angström

F, bleu-vert, hydrogène : 0,48613 angström

A chacune de ces longueurs d'onde est associée, pour le milieu, un indice, soit, respectivement n_C , n_d et n_F .

Voici les valeurs de ces indices pour différents types de verres.

Verres	n_C	n_d	n_F
Boro-silicate de type crown, utilisé pour les prismes à réflexion totale	1,5142	1,5167	1,5223
Crown dur (le verre à bouteille, verdâtre, a la même composition)	1,5205	1,5232	1,5294
Crown dense de baryum (indispensable pour les objectifs photographiques)	1,5860	1,5889	1,5956
Flint : contient davantage d'oxyde de plomb ; utilisé pour les prismes de spectographie	1,6153	1,6203	1,6324
Flint extra-dense : contient beaucoup d'oxyde de plomb	1,6943	1,7010	1,7175
Fluorite (fluorure de calcium cristallisé)	1,4325	1,4338	1,4370
Quartz cristallin	1,5419	1,5443	1,5497

La fibre la plus simple est la fibre nue, non-gainée ; à la surface de celle-ci, l'indice de réfraction passe brusquement de la valeur n_1 correspondant au matériau de la fibre, à la valeur n_0 du milieu ambiant (n_0 vaut 1 s'il s'agit d'air). Les premières études sur ce type de fibres remontent à 1910, et sont le fait de D. Hondros et P. de Bye. Plus récemment, en 1951-1952, R.E. Beam réalisa également des travaux avec ces fibres à la Northwestern University (Evanston, Etats-Unis). Cependant, il est peu aisé de réaliser un quelconque système de communications avec des fibres nues : un support de ces fibres modifiera leurs propriétés de transmission de la lumière. On n'utilise des fibres nues, actuellement, qu'en laboratoire, pour évaluer les qualités des matériaux pour fibres, et les techniques de fabrication de celles-ci : par exemple, on mesure les pertes optiques, ainsi que les mécanismes de pertes, avec des fibres nues, sans support sur des longueurs de plus de 60 mètres.

La fibre gainée, dans laquelle le cœur, de rayon

« a » et d'indice n_1 est entouré par un revêtement d'indice n_2 inférieur à n_1 , apporte une solution viable aux problèmes des télécommunications optiques. Lorsque le rayon « a » vaut 5 microns environ, un seul mode de propagation n'est possible dans les fibres, dites monomodes. Les fibres monomodes doivent être associées à des sources également monomodes, c'est-à-dire les lasers. Dans bien des cas d'applications, il est préférable, dans l'état actuel des techniques, d'utiliser des sources de lumière non-cohérente, telles que les diodes électroluminescentes. La lumière, dans les fibres gainées, est confinée essentiellement dans le cœur ; on observe bien quelques pertes optiques dans la gaine, mais elles décroissent, radialement, de manière exponentielle pour devenir négligeables au rayon extérieur « d ». On peut dès lors manipuler les fibres gainées sans en modifier les caractéristiques de transmission. Le diamètre extérieur de ces fibres est compris, dans la plupart des cas, entre 75 et 100 microns ;

ce diamètre est fixé, souvent, par des considérations mécaniques plutôt qu'optiques.

Les fibres à cœur liquide sont les proches parents des fibres multimodes. Elles ont été inventées en 1972 par J. Stone, ainsi que par G.J. Olgivie ; d'importantes études ont également été menées en Grande-Bretagne par W.A. Gambling. Ces fibres sont constituées d'un cœur liquide, en tétrachloroéthylène par exemple, contenu dans un tube en verre servant de gaine mais l'indice du liquide varie avec les températures de sorte que le nombre de modes se propageant dans une fibre à cœur liquide dépend beaucoup de l'environnement.

Dans les fibres monomodes en verre, les dimensions du cœur peuvent être augmentées en adoptant la technologie de tube diélectrique : un tube en verre d'indice n_1 est noyé dans un verre d'indice n_2 .

Une importante technologie a été mise au point voici moins d'une dizaine d'années : la composition du verre varie entre le centre de la fibre et sa périphérie, de telle sorte que l'indice du

verre suit une loi parabolique :

$$n = n_1 [1 - b (r/a)^2]$$

n_1 étant l'indice du verre au centre de la fibre, r variant entre 0 et a , rayon extérieur et b étant un coefficient compris entre 0,01 et 0,02. Les fibres de ce type, dites à « gradient d'indice » ont été développées au Japon, sous la dénomination « Selfoc » par la Nippon Electric Co. et la Nippon Sheet Glass Co.

On peut imaginer divers profils de variation radiale d'indice ; l'intérêt de fibres à gradient d'indice est grand puisqu'elles sont fabriquées à partir d'un matériau unique. Les pertes dans les fibres sont très faibles (moins de 6 dB/km), ce qui constitue un autre avantage important.

En 1973, une nouvelle géométrie de fibre a été inventée aux Bell Telephone Laboratories, par S.E. Miller, E.J. Marcatili et P. Kaiser. La fibre est constituée d'une fibre fine supportée, au moyen d'une membrane, par un tube de grand diamètre ; la structure est entièrement réalisée en silice fondue.

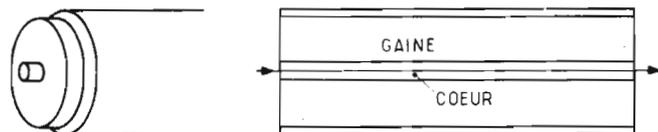


Fig. 4. - Dans les fibres monomodes, seul un rayon axial peut s'y propager.

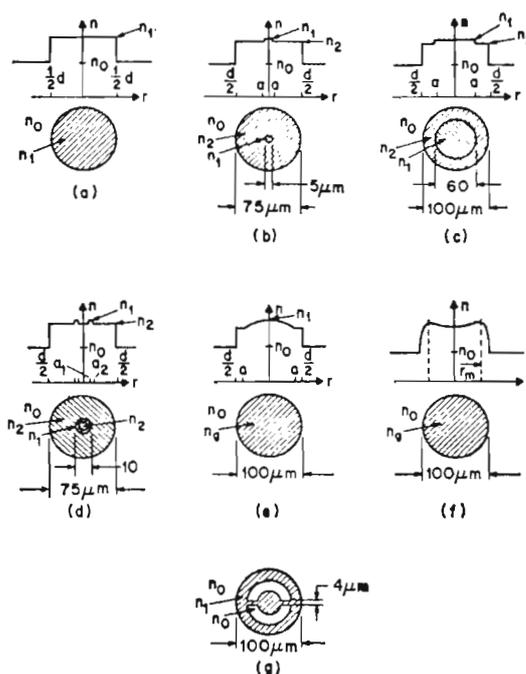


Fig. 5. - Les diverses géométries de fibres optiques et la variation radiale correspondante de l'indice de réfraction.

- a) fibre non gainée
- b) fibre gainée monomode
- c) fibre gainée multimode
- d) fibre à tube diélectrique
- e) fibre à indice parabolique
- f) fibre à gradient d'indice
- g) fibre à matériau unique.



Photo 2. - Fibre à cœur liquide : des pertes inférieures à 13,5 dB/km ont été mesurées avec une fibre longue de 450 m, au moyen d'une source de lumière incohérente émettant sur la longueur d'onde de 1,08 micron. Plus généralement, une fibre dont le cœur, en tétrachloroéthylène, de diamètre égal à 65 microns, est contenue dans un tube en quartz de 15 microns d'épaisseur, présente des pertes inférieures à 20 dB/km dans deux plages de longueur d'onde : entre 0,84 et 0,86 microns, ainsi qu'entre 0,98 et 1,10 micron. Ces plages sont fort intéressantes puisqu'elles correspondent aux plages de fonctionnement, respectivement des diodes en arséniure de gallium et des lasers à grenat d'yttrium-aluminium (photo Bell Telephone Laboratories).



Photo 3. - La fibre supportée par une membrane : ses pertes sont très faibles puisqu'elles descendent en-dessous de 5 dB/km, Peter Kaiser, ici, en démontre les possibilités (photo Bell Telephone Laboratories).

LES PERTES DANS LES FIBRES

Une fibre, pour être utilisable en télécommunication optique, doit posséder des qualités optiques fondamentales. En particulier les pertes doivent être minimales : pour ce faire, il faut connaître le mécanisme exact des pertes lors de la transmission de lumière dans des fibres optiques.

Le plus important mécanisme de pertes est l'absorption de la lumière par le matériau. Voici peu d'années, les pertes dans les fibres attei-

gnaient de très hauts niveaux (1000 à 4000 dB/km). Il est apparu que certaines compositions de verre pourraient conduire à de faibles pertes, en particulier en éliminant tous les ions métalliques ayant des transitions électroniques dans la bande de longueur d'onde comprise entre 0,5 et 1 micron (fig. 7) : c'est en particulier le cas des ions de chrome, de cuivre ou de fer (ferreux) ; l'ion de fer ferrique est moins gênant puisque son pic d'absorption se situe en-dessous de 0,4 micron, donc hors du domaine utile pour les télécommunications optiques.

L'ion hydroxyle (OH^-) est un autre ion néfaste dans les verres, puisque sa bande d'absorption se situe dans cette plage utile.

Un autre facteur de pertes est la diffusion de la lumière par le matériau, selon divers mécanismes (diffusion Rayleigh, diffusion Mie, diffusion Raman stimulée, diffusion Brillouin stimulée). Ces effets peuvent résulter de fluctuations thermiques ou de variations locales de composition, à une échelle très faible, de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière.

Les variations de géométrie

des fibres créent aussi des pertes par diffusion ; une fibre optique courbée rayonnera et sera également le siège de pertes. Enfin, une dernière source de pertes est constituée par la gaine de la fibre optique.

UN CHOIX JUDICIEUX DE MATÉRIAUX

Pour abaisser les pertes dans les fibres en-dessous de 10 dB/km, les chercheurs ont porté leurs efforts sur l'amélioration des matériaux et de l'élaboration des fibres optiques.

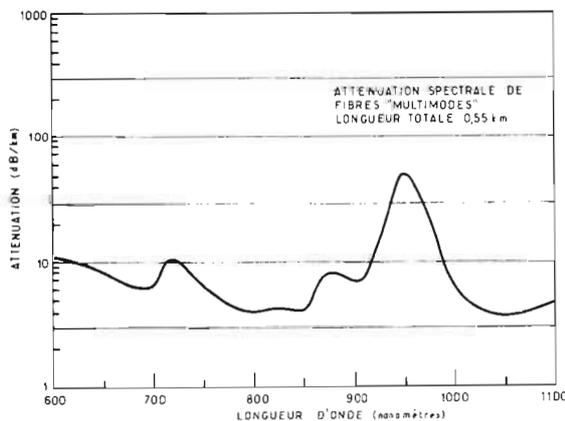


Fig. 6. - En 1972, Corning annonçait la réalisation de fibres à très faibles pertes : 4 dB/km. Depuis, les 2 dB/km ont été atteintes.

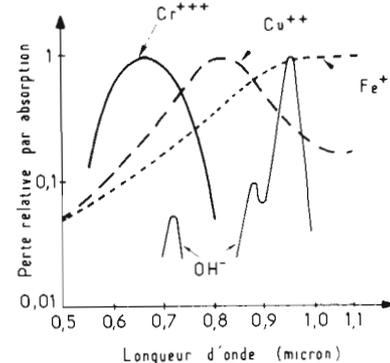


Fig. 7. - Effet de certains ions sur les pertes par absorption de fibres en verre, selon la longueur d'onde de la lumière.

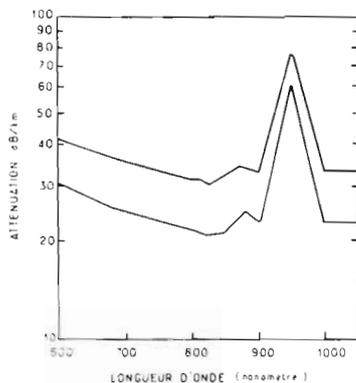


Fig. 8. - Corning commercialise des faisceaux de fibres optiques pour la réalisation de prototypes de systèmes de communications optiques. Ces faisceaux contiennent 19 guides d'onde optique, gainés dans du chlorure de polyvinyl. On leur a associé une source optique (diode électroluminescente) et un récepteur (photodiode à avalanche). Ces faisceaux livrés en rouleaux de 500 mètres coûtaient en juin 1974, 57 dollars par mètre jusqu'à des longueurs de 5 km et 28,5 dollars au-delà.

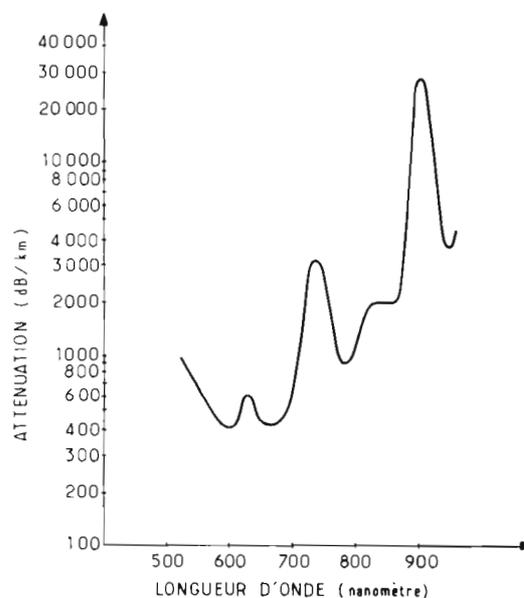


Fig. 9. - Fibre en plastique « PFX » de DuPont : ses pertes sont relativement faibles puisqu'elles descendent à 470 dB/km à la longueur d'onde : 0,656 micron.

Les fibres à cœur liquide figurent parmi celles à basses pertes. Les premiers essais menés dès 1971, ont été réalisés avec du tétrachloroéthylène. En 1972, des fibres en silice de marque « Heralux »,

de diamètre intérieur compris entre 70 et 100 microns, et emplies de tétrachloroéthylène deshydraté, étaient caractérisées par des atténuations inférieures à 8 dB/km dans le proche infrarouge (1,09

micron, 1,205 micron et 1,280 micron). Gambling a utilisé pour sa part de l'hexachlorobuta-1,3-diène dans un tube de 50 microns de diamètre intérieur : la fibre obtenue avait une valeur minimale de pertes égale à 7,3 dB/km.

Pour les fibres gainées en verre, la silice fondue paraît être le meilleur matériau : Corning a obtenu les valeurs les plus faibles de pertes, soit 2 dB/km à 1,06 micron.

Gambling, à la fin de 1974, a conçu une fibre constitué d'un cœur en verre de phosphosilicate, avec une gaine en silice pure. Les pertes mesurées sont extrêmement faibles entre 0,4 et 1,1 micron et atteignent la valeur minimale de 2 dB/km dans le proche infrarouge.

Pour des communications à courtes distances (50 mètres), Du Pont a développé une fibre gainée en matière plastique ; elle est constituée d'un cœur en polyméthyl-méthacrylate. Ce type de fibres pourrait servir pour des communications digitales en application informatique.

UN SECOND PARAMÈTRE FONDAMENTAL

La bande passante de modulation d'une fibre est le second paramètre fondamental d'une fibre ; cette bande passante est limitée par l'élargissement d'une impulsion fine lors de la propagation dans une fibre. La largeur de bande de modulation que l'on peut mettre sur une porteuse a été étudiée par le CNET en mesurant l'élargissement d'une impulsion fine lors de la propagation dans une fibre. Les résultats obtenus montrent que les bandes passantes des fibres sont élevées : 200 MHz à 2 GHz. Les plus fortes bandes passantes sont obtenues avec les fibres monomodes ou à gradient d'indice, tandis que la bande des fibres multimodes se situe au bas de l'échelle. Une bande passante de l'ordre du gigahertz permet de transmettre environ 200 canaux de télévision noir et blanc sur une même ligne de transmission.

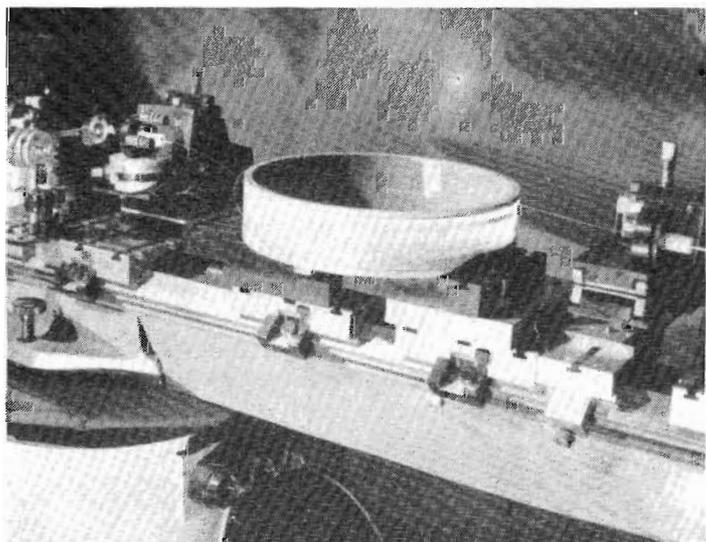


Photo 4. - Mesures de propagation dans les fibres optiques à gradient d'indice (photo CNET-D^r. L.T.A.).

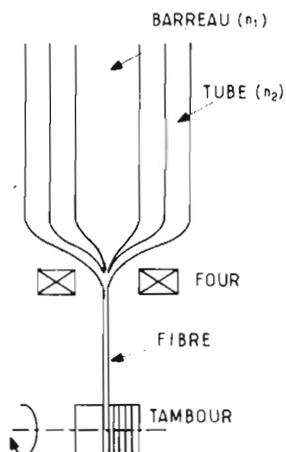


Fig. 10. - Méthode barreau-tube.

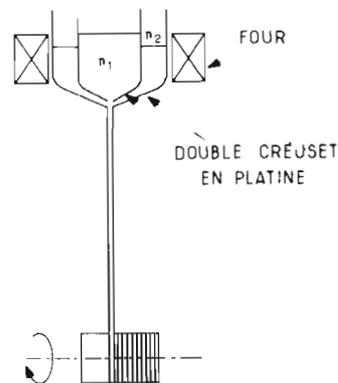


Fig. 11. - Méthode « double-creuset ».

Malheureusement de nombreuses difficultés techniques et technologiques restent à surmonter avant d'utiliser efficacement les fibres monomodes. Les fibres multimodes, bien que nettement plus dispersives, présentent un intérêt pratique considérable, dans le court-terme.

DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ÉLABORATION DES CONDUCTEURS APPARAISSENT

La plupart des difficultés rencontrées dans la fabrication des fibres gainées

conductrices de lumière provient de la nécessité d'au moins deux matériaux d'indices de réfraction différents, l'un pour le cœur, l'autre pour la gaine.

Le fibrage s'effectue généralement en filant la masse vitreuse chauffée. Les matériaux de gaine et de cœur sont

mis en contact à haute température et refroidis simultanément, lors de l'étirage. Cette technologie impose le choix des verres parmi des matériaux de caractéristiques mécaniques très voisines, en particulier coefficient de dilatation et viscosité. Une seule méthode échappe à cet impé-

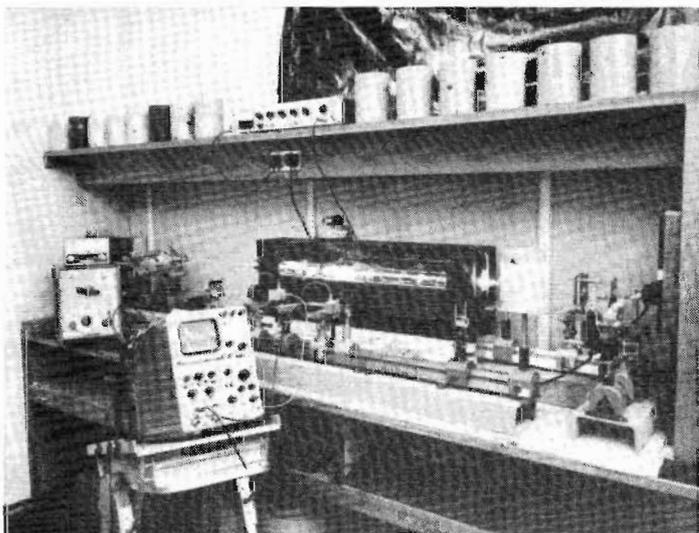


Photo 5. - Mesure de la bande passante d'une fibre à cœur liquide de 200 m de longueur, à l'université de Southampton. Au centre, on voit le laser à hélium-néon de 15 mW, fonctionnant en mode bloqué et produisant des impulsions de 0,5 ns à la fréquence de 80 MHz (trace inférieure de l'écran cathodique). L'impulsion de sortie est détectée par une photodiode à avalanche et elle est visualisée sur la trace supérieure de l'oscilloscope. Des dispersions équivalentes à une largeur de bande de plusieurs gigahertz pour un kilomètre de câble ont été mesurées dans des fibres dont le cœur avait un diamètre de 100 microns.

* HAUTE FIDELITE - VIDEO
■ KITS et COMPOSANTS ELECTRONIQUES

HIFI un professionnel
JEAN GOUDERT
au service de l'amateur exigeant

* 85 - ■ 180 bd. de la MADELEINE
06000 NICE tel: (93) 87.58.39

Pour une FORMATION TECHNIQUE

RIEN NE VAUT UNE ECOLE SPECIALISEE UNIQUEMENT
DANS LES CARRIERES TECHNIQUES

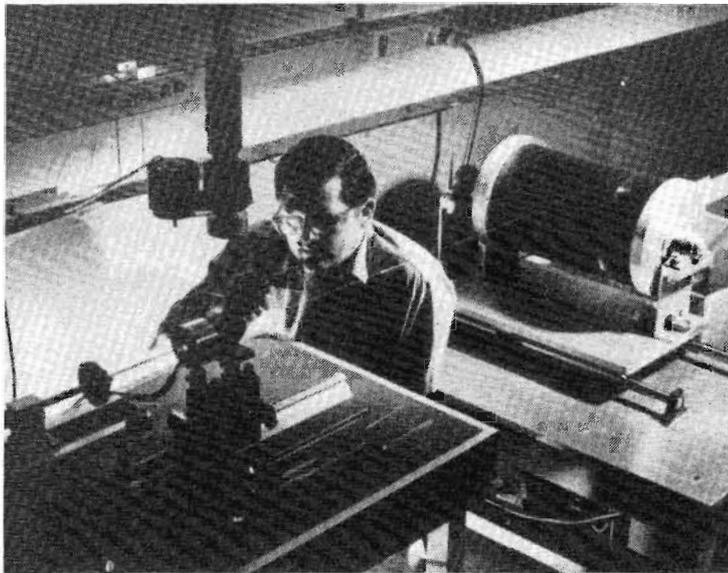
Electronique, Informatique, Electricité, Automobile, Radio, Télévision, Méca-
nique, Travaux du Bâtiment, Aviation, Chimie, etc...

Demandez la brochure gratuite n°160 des préparations à
distance EXCLUSIVEMENT TECHNIQUES à :

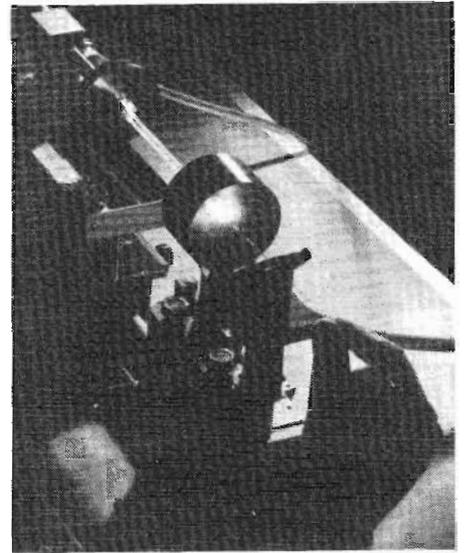
Ecole Technique Moyenne et Supérieure de Paris :
94, rue de Paris. 94220 CHARENTON

ORGANISME PRIVE REGI PAR LA LOI DU 12.7.71, SOUMIS
AU CONTROLE PEDAGOGIQUE DE L'ETAT

Pour nos élèves belges :
64, boulevard Joseph-II - CHARLEROI



A



B

ratif : elle consiste à fabriquer un cœur à haute température et à l'enrober par un matériau plastique.

Lorsqu'on utilise pour le cœur de la silice pure, on adopte, pour la gaine, soit une silice dopée, soit des borosilicates très riches en silice.

Dans la méthode de fibrage dite « tube et barre », une « préforme » comprend un tube en matériau d'indice faible, et une barre en matériau d'indice plus élevé, constituant le cœur, ajusté à l'intérieur du tube. La soudure barre-tube peut être effectuée au four avant étirage, ou pendant l'étirage dans un gradient thermique convenable. La préforme est chauffée et étirée ; la fibre résultant s'enroule sur un tambour. L'expérience montre que la fibre est exactement homothétique de la préforme ce qui a permis d'imaginer des formes de fibres sophistiquées, mais fabriquées à partir d'un seul verre.

Dans la méthode du double creuset, deux creusets coaxiaux contiennent, l'un le verre de cœur, l'autre le verre de gaine. Ils sont placés dans un four et le verre est filé par des buses dont le diamètre et la distance conditionnent

les dimensions finales de la fibre.

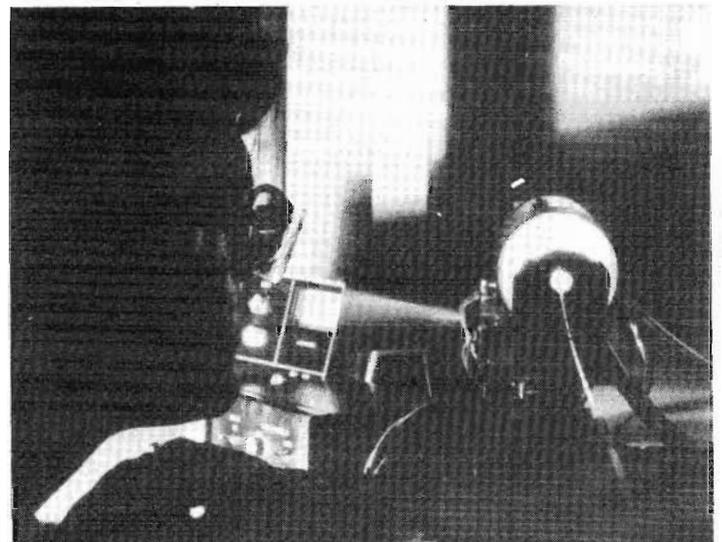
Une troisième méthode ne fait intervenir qu'un seul creuset, dans lequel on a préparé le verre de cœur ; on verse sur celui-ci le verre de gaine puis on tire ensuite, de bas en haut, une préforme ; celle-ci est ensuite étirée par la méthode « tube et barre ».

Les fibres à gradient d'indice doivent être dopées. Les diverses techniques de dopage sont : le mélange en phase liquide ou vapeur, la diffusion, l'échange d'ions et l'hydrolyse à la flamme. Les fibres Selfoc sont réalisées par échange ionique : des ions sodium ou potassium sont substitués à des ions thallium à proximité de la surface.

Marc FERRETTI

A LIRE AVEC INTÉRÊT

- « Technologie des fibres optiques » par J.-C. Raymond. Revue technique Thomson CSF, Vol. 6, N° 4 (Déc. 1974).
- « Optical fibers for communications » par D. Gloge. Applied Optics, Vol. 13, N° 2 (Février 1974).



C

Photo 6. -

- a) Les chercheurs des Bell Laboratories utilisent un laser pour fondre un barreau de verre et réaliser le fibrage...
- b) ... Le laser utilisé, à CO₂...
- c) ... est une source de chaleur propre et facilement contrôlable.

- « Les matériaux pour fibres optiques et leur caractérisation » par M. Passaret. Annales des Télécommunications, tome 29, N°s 5-6 (Mai-juin 1974).

- « Les câbles optiques » par J.-S. Cook. La Recherche, N° 45 (Mai 1974).
- « Les fibres optiques » par R. Bouillie et M. Tremoux. L'Echo des Recherches, octobre 1973.