Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 67 (1976)

Heft: 20

Artikel: Prinicpes de la transmission par Fibres Optiques

Autor: Robert, Ph.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915215

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.11.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Principes de la transmission par Fibres Optiques[1])

Par Ph. Robert

621.391.63:681.7.068

Des fibres de verre, d'un diamètre de l'ordre de 50 à 100 μm sont utilisées aujourd'hui pour acheminer des informations. Leur emploi dans des réseaux en est à l'état expérimental dans plusieurs pays. Après avoir rappelé le principe de guidage de la lumière dans une fibre et la notion de mode de propagation, l'auteur décrit les principaux types de fibres optiques et les performances particulières de chacun d'eux. Les procédés les plus importants de fabrication de fibres sont brièvement décrits. La nécessité de disposer de câbles à fibres optiques et de connecteurs adaptés est mentionnée.

Glasfasern im Durchmesserbereich von 50 bis 100 μm werden heute für Informationsübermittlungen eingesetzt. Deren Anwendung in Fernmeldenetzen ist in verschiedenen Ländern im Versuchsstadium. Nach einem kurzen Rückblick über das Prinzip der Lichtleitung und der Lichtfortpflanzung in einer Faser beschreibt der Autor die grundsätzlichen Arten der Lichtfasern und gibt deren besondere Daten an. Die wichtigsten Faserherstellungsverfahren sind kurz beschrieben. Die Notwendigkeit, über Lichtfaserkabel und angepasste Verbindungselemente zu verfügen, wird erwähnt.

1. Introduction

Les procédés les plus anciens utilisés par les hommes pour communiquer entre eux font appel, côté récepteur, à la vue et à l'ouïe principalement. Côté émetteur, les moyens mis en œuvre ont toujours présenté une certaine variété. Dans le domaine acoustique, ce sont par exemple le cri, le langage articulé, le tambour ou la sirène. Dans le domaine optique, les feux allumés au sommet de tours, dont notre pays possède encore quelques beaux exemplaires, ou les signaux de fumée plus visibles de jour furent de pratique courante. Le contenu de ces informations ne pouvait être que de nature très élémentaire, la modulation des signaux indiquant seulement que c'était tel message conventionnel que l'on voulait transmettre, p. ex.: l'ennemi arrive du Nord! L'invention du code Morse en 1844 allait permettre d'enrichir de façon décisive le contenu des messages, optiques et d'autre nature. Mais d'autres solutions visant au même but avaient été développées plus tôt, la plus ancienne dont on ait connaissance datant de 300 ans p.C. Elle est due au général grec Polybe qui transmettait toutes les lettres de l'alphabet au moyen de signaux émis des sommets de deux tours voisines. L'alphabet était représenté sous une forme matricielle, l'une des tours indiquait la ligne, l'autre la colonne correspondant à la lettre à transmettre. Mis à part le domaine de la navigation maritime au voisinage des côtes, l'usage de rayons lumineux comme vecteurs d'information marque une régression quasi totale avec l'apparition des techniques de transmission électriques. En 1966 pourtant, paraissent deux articles [1; 2][2]) traitant de la propagation d'ondes lumineuses et qui envisagent sérieusement l'utilisation de fibres optiques pour les télécommunications. Dès ce moment, des efforts considérables sont entrepris en Europe, aux USA et au Japon pour mettre au point la nouvelle technique.

2. Propriétés des fibres optiques

Formellement, les fibres optiques peuvent être considérées comme des lignes de transmission classiques, caractérisées par leur affaiblissement linéique, mesuré en dB/km, et leur dispersion, c'est-à-dire l'écart entre les temps de propagation des signaux les plus lents et les plus rapides, sur une longueur fixée. La dispersion s'exprime couramment en ns/km. Les fibres disponibles en 1968 présentaient un affaiblissement supérieur à 1000 dB/km; la mesure des progrès faits depuis cette époque est donnée par les résultats obtenus aujourd'hui pour les meilleures fibres: 1 à 2 dB/km. Pour l'instant, il s'agit là de performances de laboratoire, mais le seuil de compétitivité économique se situe aux environs de 10 dB/km et de telles fibres peuvent aujourd'hui être fabriquées industriellement.

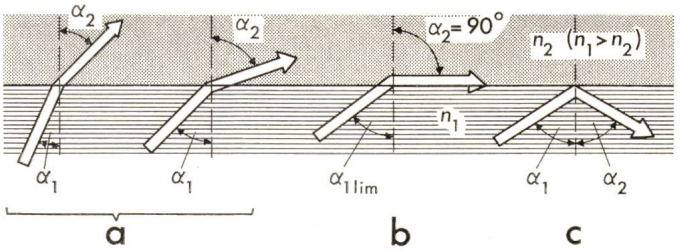

Fig. 1 Comportement d'un rayon lumineux à l'interface de deux milieux transparents d'indices n_1 et n_2

a Réfraction: $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$ (2)
b Angle de réfraction limite: $\alpha_{1\,lim} = \text{Arc} \sin n_2/n_1$
c Réflexion totale: $\alpha_1 = \alpha_2$

2.1 *Principe de guidage de la lumière dans une fibre*

Un milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction n, défini par

$$n = \frac{\text{vitesse de la lumière dans le vide}}{\text{vitesse de la lumière dans la matière}} \qquad (1)$$

L'indice de réfraction est fonction de la longueur d'onde de la lumière; c'est l'une des causes de la dispersion dans les fibres optiques.

Lorsqu'un rayon lumineux rencontre la surface de séparation de deux milieux d'indices différents, n_1 et n_2, il subit un changement de direction, régi par la loi de Descartes (fig. 1). Pour un angle d'incidence $\alpha_1 > \text{Arc} \sin n_2/n_1$ le rayon subit une réflexion sur l'interface et reste donc emprisonné dans le milieu d'indice n_1.

Dans sa forme la plus simple (fig. 2), une fibre optique est constituée d'une partie centrale, le cœur, placée dans une gaine appelée «cladding» pour la distinguer de la gaine proprement dite, entourant le cladding et qui assure une fonction de protection mécanique. (La gaine n'est pas représentée à la fig. 2). L'indice de réfraction du cœur est plus élevé que celui du cladding. Une partie des rayons émis par une source placée dans la section de la fibre va donc subir une réflexion totale à l'interface cœur-cladding. On voit facilement que, sauf courbure extrême de la fibre, ces rayons resteront dans la fibre jusqu'à l'autre extrémité de celle-ci. Certains rayons peuvent subir une réflexion totale à l'interface extérieur du cladding, ce sont les rayons guidés marginaux dont nous ne parlerons pas ici.

[1]) Conférence donnée lors de l'Assemblée générale de l'ASE, le 4 septembre 1976 à Weinfelden.

[2]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

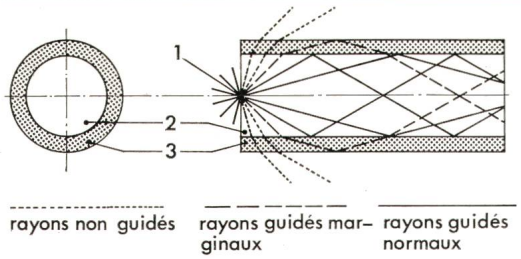

Fig. 2 Principe du guidage d'une onde lumineuse par une fibre de verre
1 Source ponctuelle de lumière monochromatique
2 Verre d'indice n_1 : cœur
3 Verre d'indice n_2 : cladding

2.2 Notion de mode de propagation

L'analyse précise de la propagation de la lumière dans la fibre est en principe simple. Il faut résoudre les équations de Maxwell pour le cœur et le cladding, puis soumettre les solutions générales trouvées aux conditions de couplages habituelles pour le champ électrique et le champ magnétique, à l'interface cœur-cladding. On obtient de la sorte une équation aux valeurs propres de laquelle la notion de mode de propagation apparaît clairement. Pratiquement, ces calculs sont fort longs [3] et nous introduirons ici cette notion de mode par analogie avec les cordes vibrantes (fig. 3).

Une corde assujettie à deux supports fixes A et B peut vibrer, p.ex., sur les modes 1, 2, 3. Tous ces modes de vibration ont en commun de présenter un déplacement latéral nul de la corde sur les appuis, ce qui est conforme aux contraintes imposées du problème. Un mode n° 4 ne respectant pas ces contraintes (déplacement non nul sur le support B) ne peut exister. De façon similaire, seuls les rayons pénétrant dans la fibre sous certains angles α_i déterminés peuvent donner lieu à des rayons guidés se propageant sans affaiblissement, dans un milieu idéal, sans pertes. Même dans un tel milieu, les autres rayons guidés injectés par la source s'atténuent et deviennent négligeables après une «distance d'égalisation». Les rayons correspondant aux angles α_i constituent l'ensemble des modes de propagation de la fibre. D'un type à l'autre de fibre, le nombre de ces modes varie énormément.

2.3 Principaux types de fibres optiques

Il existe deux classes de fibres optiques, les fibres monomodes et les fibres multimodes (fig. 4). Dans les premières, le diamètre du cœur et les indices des verres utilisés pour le cœur et le cladding sont choisis de telle façon qu'un seul mode puisse se propager dans la fibre. Il faut pour cela que le rayon r du cœur satisfasse l'équation

$$r \leqq \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2{,}405}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \tag{3}$$

λ longueur d'onde de la lumière utilisée
n_1 indice du cœur
n_2 indice du cladding

Pour une longueur d'onde typique de $\lambda = 850$ nm et une différence d'indices entre cœur et cladding de 1%, p.ex. $n_1 = 1{,}515$ et $n_2 = 1{,}500$ $r \leqq 1{,}53$ µm. Une dimension aussi réduite pose des problèmes difficiles de fabrication et d'utilisation. Les positions relatives de deux fibres que l'on désire raccorder l'une à l'autre doivent être ajustées à une fraction de µm près. Il en est de même lors du raccordement à un émetteur ou un récepteur optoélectronique. Ne propageant qu'un mode, ces fibres sont totalement exemptes de dispersion modale, ce qui leur confère une bande passante nettement plus grande que celle des autres fibres.

Les *fibres multimodes* sont de deux types: à saut d'indice et à gradient d'indice.

La *fibre à saut d'indice* est la plus simple. Le cœur possède un diamètre $2\,r_0$ relativement grand, compris généralement entre 25 et 100 µm. Il est constitué, comme dans le cas de la fibre monomode d'un verre d'indice n_1 constant en fonction du rayon. Le cladding, d'indice $n_2 < n_1$ a une épaisseur de quelques dizaines de µm. Le nombre N de modes susceptibles de se propager dans ce type de fibres est considérable et peut être évalué par la relation suivante:

$$N \cong 2 \left(\frac{\pi\, r_0}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2) \tag{4}$$

Pour un rayon $r_0 = 25$ µm, la même lumière et les mêmes indices que dans l'exemple de la fibre monomode, (4) indique la propagation simultanée de 772 modes différents. Les rayons lumineux associés au mode axial et au mode limite se propagent à la même vitesse mais les longueurs l_{ax} et l_{lim} de leurs chemins sont différentes:

$$l_{ax}/l_{lim} = \sin \alpha_{lim} = n_2/n_1 \tag{5}$$

Ils arriveront donc à des temps différents, séparés par un intervalle Δt, à l'extrémité de la fibre. Il y a dispersion, et l'on parle ici de dispersion modale:

$$\Delta t = 3{,}33 \cdot 10^{-6}\, L \frac{n_1}{n_2} (n_1 - n_2) \tag{6}$$

Δt écart des temps en s
L longueur de la fibre en km

Pour 1 km de la fibre considérée, $\Delta t = 50$ ns. La dispersion modale apporte donc une très sévère limitation de la bande passante B de la fibre, qui, dans le cas de fibres multimodes à saut d'indice est de l'ordre de quelques dizaines de MHz · km. Pour améliorer B, il existe deux solutions, à utiliser conjointe-

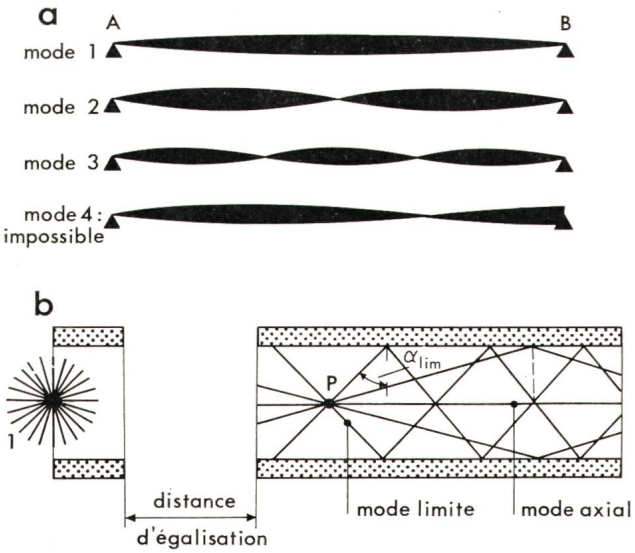

Fig. 3 Notion de modes de propagation
a Analogie avec la vibration d'une corde
b Modes de propagation passant par P
1 Source ponctuelle monochromatique
Remarque: Pour la clareté de la figure, on a représenté une fibre à 3 modes. Le nombre réel de modes est indiqué dans le texte.

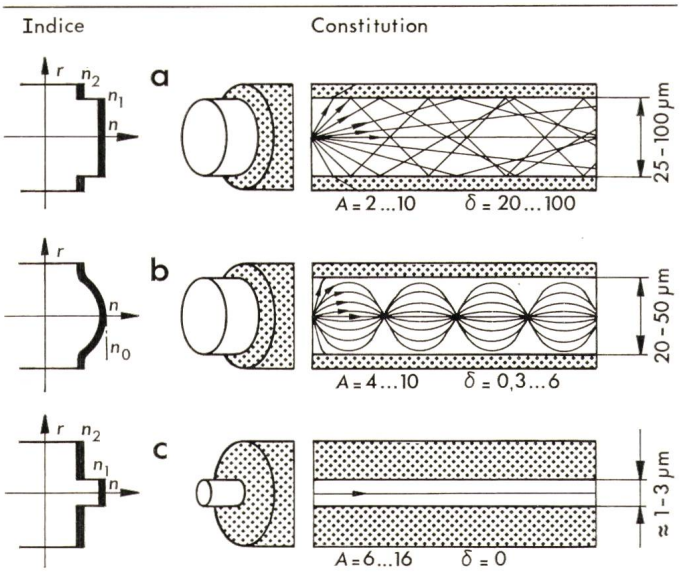

Fig. 4 Principaux types de fibres
a Fibre multimode à saut d'indice
b Fibre multimode à gradient d'indice
c Fibre monomode
A affaiblissement linéique en dB/km
δ dispersion modale en ns/km

ment ou séparément. La première est de diminuer le diamètre du cœur, ce qui limite le nombre de modes possibles (équ. 4), la seconde est de diminuer l'écart des indices du cœur et du cladding (équ. 4 et 6). Chacune de ces solutions possède malheureusement des inconvénients et ne peut être appliquée qu'avec mesure. En diminuant le diamètre du cœur, on retrouve les problèmes cités pour la fibre monomode, en diminuant l'écart des indices, on accroît la sensibilité de la fibre aux déformations mécaniques [4] ce qui peut conduire en exploitation à une augmentation spectaculaire de l'atténuation. Pour ces raisons, on recherche plutôt une diminution de la dispersion modale par l'emploi du deuxième type de fibres multimodés.

Les *fibres à gradient d'indice* sont faites d'un verre dopé de façon inhomogène de manière à présenter un indice de réfraction variant en fonction du rayon, selon la loi:

$$n(r) = n_0 \left\{1 - \gamma \left(\frac{r}{r_0}\right)^m\right\} \tag{7}$$

r_0 rayon du cœur

γ est de l'ordre de grandeur 10^{-2}. Pour une valeur de m voisine de 2, tous les modes se propageant dans cette fibre ont pratiquement la même vitesse. La dispersion modale de ce type de fibres est donc faible, de l'ordre de quelques ns/km. Elle résulte d'un mode de guidage particulier. Les rayons des différents modes ne viennent pas subir une réflexion totale à l'interface cœur-cladding, mais sont déviés de façon continue par la variation spatiale de l'indice, qui les ramène périodiquement à couper l'axe de la fibre. L'égalité des temps de propagation des différents modes se conçoit aisément puisque ce sont les rayons s'écartant le plus de l'axe, et qui ont donc le plus long chemin à parcourir, qui séjournent le plus longtemps dans les zones de faible indice où la vitesse est la plus grande.

Utilisées avec des sources très monochromatiques comme les lasers, ces fibres présentent une bande passante de plusieurs centaines de MHz · km et sont aujourd'hui l'une des solutions techniques les plus intéressantes.

3. Fabrication des fibres optiques

Les seuls matériaux utilisables pour la fabrication de fibres destinées aux télécommunications sont le verre et la silice, dont les points de fusion sont respectivement 1100 °C et 1670 °C. Deux procédés sont utilisables pour la fabrication de fibres en verre:

La *méthode du double creuset* (fig. 5), dans laquelle un creuset central, contenant le verre destiné au cœur débouche dans un creuset concentrique contenant le verre destiné au cladding. Les creusets sont généralement en platine. En tirant rapidement le verre à la sortie des creusets, on obtient la fibre optique qu'il faut enrouler immédiatement sur un tambour. Il va sans dire que des contrôles rigoureux de température et de vitesse de tirage, entre autres, sont indispensables pour l'obtention d'une fibre de qualité acceptable. On peut fabriquer selon ce procédé des fibres monomodes, multimodes à saut d'indice et même à gradient d'indice en choisissant convenablement les verres du cœur et du cladding et en provoquant la diffusion du dopant d'un verre dans l'autre.

La *méthode de la préforme* consiste à étirer un barreau de verre d'un diamètre de l'ordre du cm et une longueur de l'ordre du m. Cette préforme qui est en quelque sorte une fibre d'un diamètre relativement gigantesque peut être obtenue en glissant un cylindre de verre dans un tube d'un verre différent. Cette technique pose des problèmes difficiles de propreté à l'interface cœur-cladding. On lui préfère souvent la méthode qui consiste à tirer la préforme d'un bain dans lequel le verre du cladding surnage sur le verre du cœur (fig. 6).

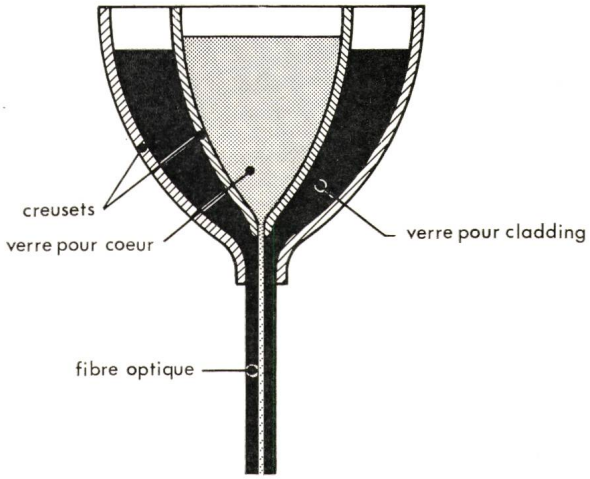

Fig. 5 Fabrication d'une fibre par la méthode du double creuset

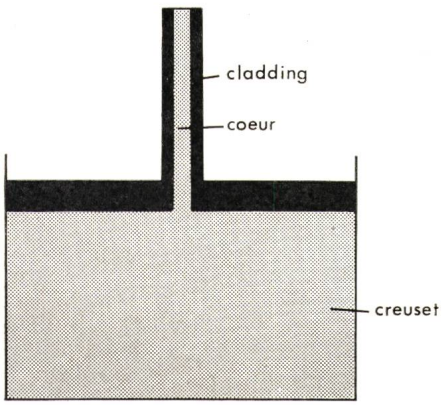

Fig. 6 Fabrication d'une préforme à partir d'un bain de deux verres

La méthode de choix pour la fabrication de fibres en silice est la *méthode CVD* (Chemical Vapor Deposition) qui passe, elle aussi, par le stade d'une préforme (fig. 7). Dans un tube de silice, on fait passer un courant de $SiCl_4 + O_2 +$ dopants qui, en présence d'une flamme produit de fines particules de silice dopée qui viennent se déposer à l'intérieur du tube. Quand la couche de silice ainsi déposée présente l'épaisseur requise, on procède à un frittage puis on rétreint le tube de façon à obtenir un cylindre plein, la préforme. Les meilleures fibres disponibles aujourd'hui sont obtenues par étirage de préformes fabriquées selon ce procédé.

Le verre et la silice utilisés doivent être d'une pureté très grande pour obtenir un affaiblissement linéique acceptable. Les métaux de transition sont à redouter, tout particulièrement dans le verre où, par exemple, une concentration en ions cuivre de 10^{-6} provoque déjà un affaiblissement de 600 dB/km à une longueur d'onde de 850 nm! Les ions OH provoquent également une absorption importante et très caractéristique.

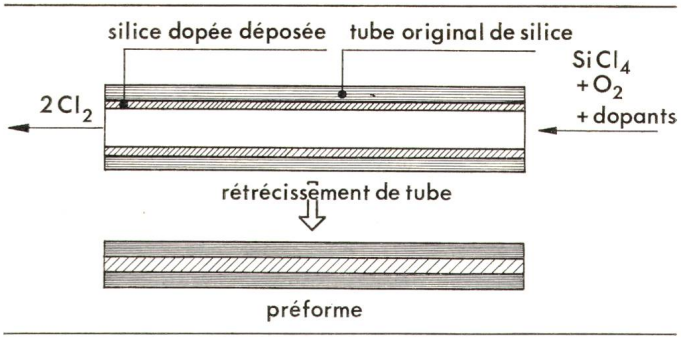

Fig. 7 Principe de la méthode CVD pour la fabrication de fibres en silice

4. Systèmes de transmission à fibres optiques

La fibre n'est que le milieu de transmission de l'information. Pour faire un système, il faut encore lui adjoindre un émetteur et un récepteur optoélectroniques auxquels pourront être raccordés des équipements standards de télécommunication. Les émetteurs utilisés sont soit des diodes laser, soit de simples diodes émettrices. Les performances de transmission obtenues avec les diodes laser sont nettement supérieures, en raison particulièrement de leur faible dispersion chromatique, pouvant descendre jusqu'à 0,2 nm. Pour les diodes émettrices, une valeur de dispersion typique est 35 nm. Des diodes PIN ou des diodes à avalanche, présentant une plus grande sensibilité, sont utilisées comme détecteurs.

Pour que la fibre optique ne reste pas un moyen théorique de constituer un réseau de télécommunication, il faut encore la rendre apte à être posée dans des caniveaux, ou directement en terre. Il faut, de plus, pouvoir la raccorder (0,1 mm de diamètre!) à d'autres fibres, aux émetteurs, aux récepteurs, etc., dans des conditions d'exploitation réelles, comparables à celles que rencontrent les monteurs d'installations téléphoniques, et qui sont très différentes des conditions de laboratoire.

Câbles à fibres optiques et connecteurs à fibres optiques existent déjà, à l'étranger, sous forme généralement de prototypes plus ou moins avancés. En Suisse, les Câbleries de Brugg, Cortaillod et Cossonay unissent depuis plusieurs années leurs efforts dans ce domaine. Des résultats concrets ont déjà été obtenus concernant la conception des connecteurs et les dispositifs de mesure des propriétés des fibres optiques. L'avenir potentiel des fibres optiques en télécommunications est considérable.

Bibliographie

[1] *K. C. Kao* and *G. A. Hockham:* Dielectric Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. Proc. IEE 113(1966)7, p. 1151...1158.
[2] *A. Werts:* Propagation de la lumière cohérente dans les fibres optiques. Onde Electr. 46(1966)474, p. 967...980.
[3] *D. Marcuse:* Theory of dielectric optical waveguides. New York/London, Academic Press, 1974.
[4] *W. B. Gardner:* Microbending Loss in Optical Fibers. Bell Syst. Techn. J. 54(1975)2, p. 457...465.

Adresse de l'auteur

Dr. sc. techn. *Philippe Robert,* S.A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, 1305 Cossonay-Gare.

Cossonay...

für die Energie-Übertragung

Ein vollständiges Kabelprogramm für alle Bedürfnisse

Im Jahre 1850 wurde das erste Unterwasser-Fernmeldekabel in den Ärmelkanal verlegt, um die Möglichkeiten des telegrafischen Systems – eine Schöpfung von Morse aus dem Jahre 1837 – auszunützen. Vier Jahre später begannen die ersten Versuche der drahtlosen Telegrafie, deren Aufschwung das Werk von Marconi war. 1875 trat Bell mit der Idee der Benützung von Metalldrähten für die Fernübertragung der durch ein Mikrofon erzeugten Stromschwankungen hervor. Das Telefon war geboren. Die Erfindung der Triode (1906) durch Lee de Forest brachte die Verstärkungsmöglichkeiten von elektrischen Signalen und bildete somit die Grundlage der ersten bedeutenden Fortschritte der Rundfunktechnik. Diese Pionierleistungen öffneten den Forschern in aller Welt neue Wege. Die Datenübertragung, -Behandlung und -Auswertung wurden stufenweise Tragsäulen unseres Alltags.

Die Laboratorien der S.A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay haben zu diesem Aufschwung beigetragen, indem sie die notwendigen Signal-, Hochfrequenz- und kombinierten Kabel entwickelten.

COSSONAY

S.A. DES CÂBLERIES ET TRÉFILERIES DE COSSONAY

1305 COSSONAY-GARE VD / SUISSE
T. 021 / 87 17 21 • TX. 24199 • TÉLÉGR. CÂBLERIES

COSSONAY