

PRINCIPES DES RESEAUX DE FIBRES OPTIQUES CONNECTIONS - CARACTERISATION DES LIAISONS

par A. FORNIER,

Ecole Nationale Supérieure de Physique
de Marseille.

« Au commencement était la fibre... » et, celle-ci, par ses nombreuses qualités permettait d'espérer une amélioration considérable, en volume et en qualité, de la transmission des informations. Mais la fibre n'est qu'un élément d'une chaîne qui, comme toute chaîne, ne peut valoir plus que ce que vaut le plus faible de ses maillons.

On a donc été amené à définir et étudier les divers composants de l'ensemble que constitue un réseau, comme celui expérimenté à Biarritz par exemple.

De plus il aurait été illusoire d'espérer que les performances de la fibre ou d'un ensemble fibre-composants, mesurées en laboratoire puissent se retrouver intactes lors d'une utilisation sur le terrain. Il fallait donc se donner également les moyens de contrôler « *in situ* » le bon fonctionnement d'une installation.

Dans les pages qui suivent nous verrons, après un bref rappel des conditions d'utilisation des fibres, ce que sont les différents composants utilisés dans les réseaux (épissures fixes et raccords démontables, coupleurs actifs ou passifs, câbles à fibre optique...). Nous décrirons enfin la méthode la plus couramment employée pour caractériser une liaison par fibre et détecter et localiser les éventuels défauts.

1. UTILISATION DES FIBRES.

Avant d'entrer plus avant dans le sujet, il faut préciser que le signal source avant d'être converti en signal lumineux subit une modulation ou un codage suivant le principe schématisé sur la fig. 1.

C'est à partir de ce schéma que l'on peut mettre en évidence une des propriétés les plus remarquables des fibres : leur très grande souplesse d'utilisation.

Il est en effet possible au fur et à mesure des besoins de multiplier la capacité de transmission de la ligne par un facteur

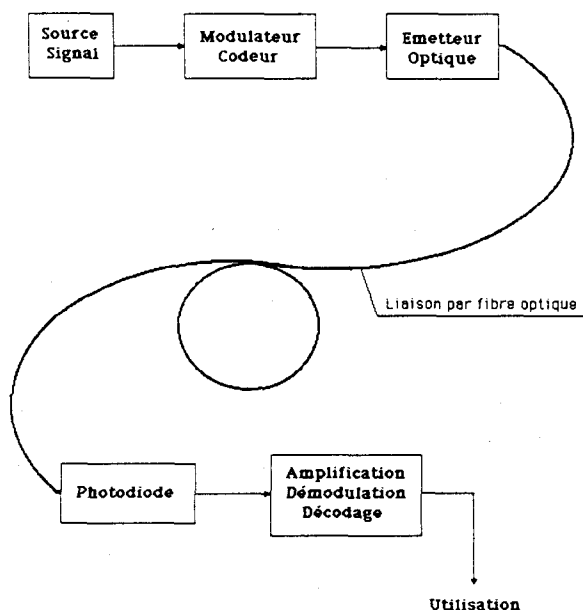


Fig. 1. — Modulation de fréquence :

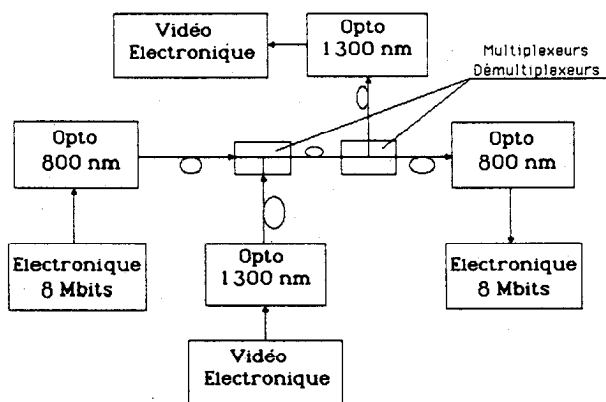
- d'impulsions (largeur, position, intervalle),
- par impulsions codées.

important (quatre et plus) sans modifier sa structure initiale. Il suffit de remplacer l'électronique de traitement, par un module plus rapide.

La capacité de transmission peut encore être accrue en utilisant plusieurs longueurs d'onde simultanément. On emploie dans ce but des multi-démultiplexeurs spectraux du type schématisé sur la fig. 2. Ces modifications ne concernent que les composants d'extrémités et peuvent donc être effectuées *a posteriori*.

2. PROBLEMES.

Qu'il s'agisse d'une liaison longue distance ou d'une distribution urbaine les problèmes qui se posent sont les mêmes, seule leur importance relative varie.



Principe du multi-démultiplexage spectral

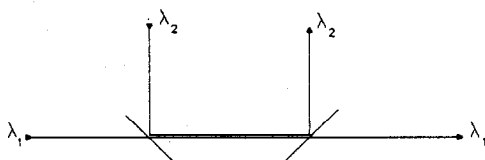
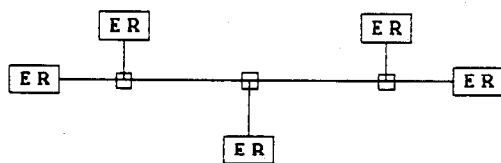
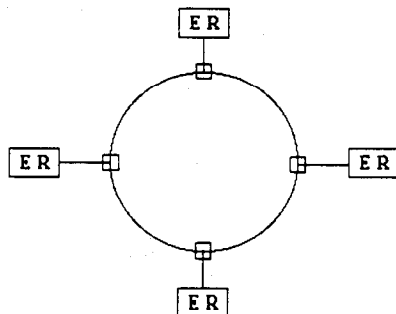


Fig. 2. — Principe du multi-démultiplexage spectral.

Dans tous les cas, il s'agit de relier entre elles plusieurs stations d'émission-réception ou de réception seulement. Les schémas-types de ces liaisons sont rassemblés sur la fig. 3.

L'implantation de tels réseaux suppose :

- l'existence de coupleurs : té,
 - étoiles-actifs ou passifs,
 - hybrides ;
- la possibilité d'effectuer des raccordements fixes ou démontables ;
- la réalisation de câbles multi-fibres présentant une résistance mécanique suffisante ;
- la mise au point de méthodes et d'appareillages permettant :
 - * la caractérisation des liaisons,
 - * la détection des défauts.

Série**Boucle**

□ Raccord en té
— Liaison fibre

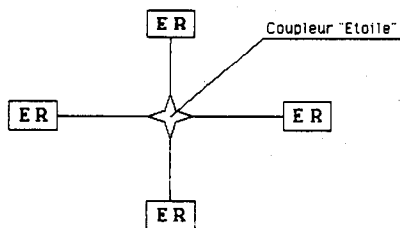
Etoile

Fig. 3. — Réseaux.

2.1. Présentation des coupleurs.

Quel que soit le modèle envisagé, il s'agit de faire transiter le signal d'une ligne vers une ou plusieurs autres lignes.

2.1.1. Coupleur actif.

Le principe en est donné par la fig. 4 *a*, dans le cas d'un couplage en té. Le seul avantage de tels coupleurs est qu'ils régénèrent le signal jouant ainsi également le rôle de répéteurs.

Leurs inconvénients principaux, hormis leur complexité résident dans le fait que la « mort » d'un composant entraîne une

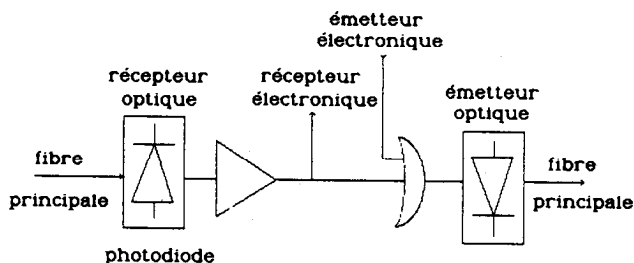


Fig. 4 a. — Exemple de Té actif.

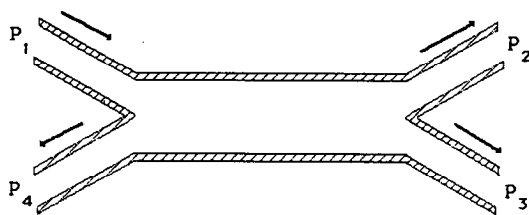


Fig. 4 b. — Principe de réalisation d'un Té passif.

rupture de la liaison et que leur principe même impose l'implantation d'une ligne d'alimentation électrique. Cette ligne ne peut être que métallique, ce qui diminue l'intérêt, ne serait-ce que du point de vue économique, d'une telle solution.

2.1.2. Coupleur passif.

Une possibilité de réalisation d'un té passif est représentée sur la fig. 4 b. Le couplage entre les fibres est réalisé par la mise en contact optique, sur une longueur suffisante, des cœurs des fibres, grâce à une érosion mécanique des gaines optiques.

L'avantage primordial d'un tel dispositif est sa longévité.

En revanche les pertes sont importantes : de 0,5 à 0,9 dB ; l'usinage en est délicat. La fig. 5 montre ce que pourrait être un répartiteur passif en étoile.

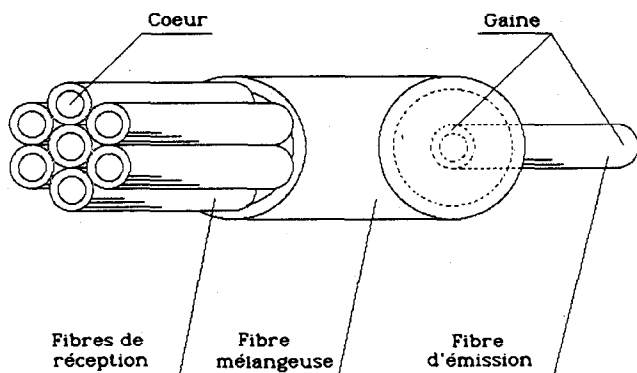


Fig. 5. — Exemple de réalisation d'un répartiteur passif.

2.2. Raccordement des fibres.

Que ce soit pour obtenir une longueur suffisante lors de l'installation ou pour réparer une rupture accidentelle, on est amené à concevoir des liaisons fixes entre deux fibres.

Par ailleurs, on ne peut imaginer une distribution figée dont toutes les connexions seraient fixes. Il faut donc prévoir aussi des raccordements amovibles.

Dans les deux cas, la question qui se pose est la même :

« Avec quelle précision faut-il assurer le positionnement des extrémités des fibres en regard pour obtenir un transfert satisfaisant du flux lumineux ? »

2.2.1. Evaluation des pertes.

Le rendement de la liaison sera évidemment maximal si le flux émergeant d'une fibre est intégralement reçu par l'autre.

Pour cela, il faut :

- que les axes des deux fibres aient la même direction,
- que la distance entre les extrémités des fibres soit nulle,
- que les faces d'entrées (ou de sorties) des fibres soient perpendiculaires à l'axe et constituent des dioptries aussi parfaits que possible,
- que l'on élimine les réflexions parasites sur les faces en regard.

Les courbes de la fig. 6 illustrent l'effet :

- d'un défaut d'alignement angulaire,
- d'un défaut d'alignement axial,

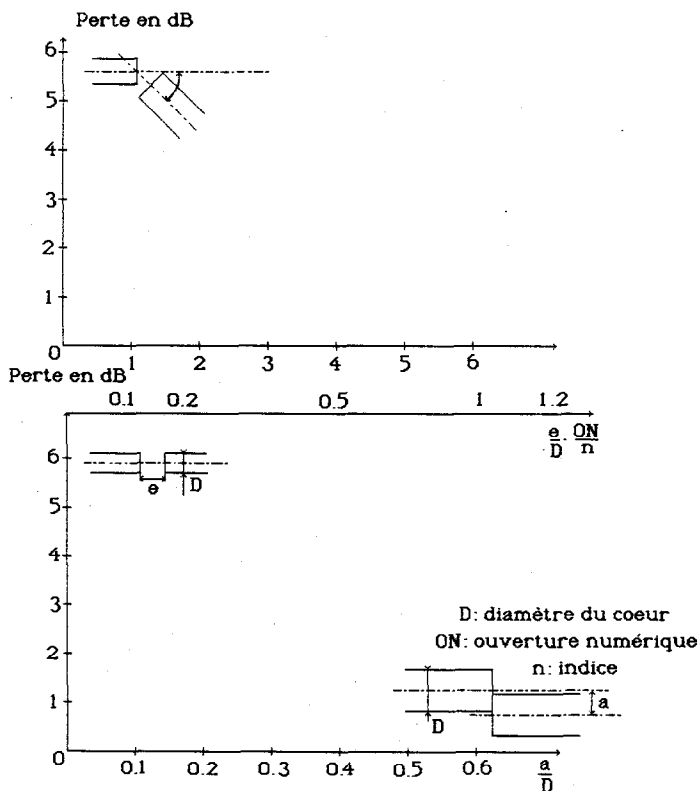


Fig. 6. — Influence d'un défaut d'alignement axial et de l'écartement e .

— d'un défaut d'écartement longitudinal.

L'examen de ces courbes montre que pour une fibre de télécommunication standard (diamètre de cœur : 50 μm . Ouverture numérique : 0,2, indice : 1,46) :

- l'écart angulaire des directions des axes ne doit pas dépasser quelques minutes,
- un défaut d'alignement axial de 5 μm conduit à une perte de 0,5 dB, ce qui est énorme devant la valeur des pertes en lignes qui est de l'ordre de 0,7 dB.km⁻¹,
- un écartement de quelques micromètres conduit à des pertes du même ordre de grandeur.

2.2.2. Généralités - Préparation des extrémités.

Les fibres, pour présenter des qualités mécaniques suffisantes, sont enduites, au tirage, d'une pellicule plastique. Pour procéder aux diverses opérations qui permettront de lier deux fibres entre elles il faut, avant tout, les débarrasser de leur enduit protecteur sur quelques millimètres. Cette opération ne doit en aucun cas léser la fibre optique proprement dite. En effet, toute rayure est non seulement une amorce de fracture, d'où fragilisation de la fibre, mais également l'origine de pertes supplémentaires par diffusion de la lumière.

On peut envisager de dissoudre la gaine dans un solvant approprié, mais cette méthode, de loin la plus sûre, est malheureusement longue et onéreuse.

Il a donc fallu mettre au point des pinces à dénuder semblables dans leur principe à celles utilisées pour les fils électriques mais beaucoup plus compliquées. En particulier la pression et la profondeur de coupe doivent être indépendantes de l'utilisateur.

Amener la face de sortie à être perpendiculaire à l'axe de la fibre et à présenter le minimum de défauts de surface n'est pas non plus un mince problème.

Le polissage, au moins pour des raisons évidentes de qualification de la main-d'œuvre, étant impraticable, on s'est tourné vers le clivage. On a donc mis au point un outillage semi-automatique qui met la fibre sous tension. Puis une pointe diamantée crée une amorce de rupture dans un plan perpendiculaire à l'axe de la fibre, une traction longitudinale supplémentaire achève le travail.

2.2.3. Raccords fixes ou épissurages.

Le positionnement des extrémités peut être effectué au moyen de méthode et d'outillages mécaniques (glissières, V,...) ou, lorsque la configuration le permet, par micro-positionnement asservi : les positions sont figées lorsque le flux transmis est maximal.

Après la mise en place des extrémités des fibres, la liaison optique et mécanique des deux fibres est obtenue soit par fusion (microchalumeau ou arc électrique), soit par collage. On emploie généralement des araldites polymérisables par irradiation ultraviolette. La durée de prise est de quelques secondes.

2.2.4. Raccords démontables.

Les raccords démontables doivent présenter les mêmes garanties d'alignement que l'outillage utilisé dans le positionnement

des fibres lors d'un épissurage et, de plus, être faciles à mettre en œuvre.

Ils sont généralement construits sur le modèle de ceux utilisés en électronique. Le positionnement et l'alignement des fibres sont assurés par les embouts mâles et femelles des éléments métalliques (ajustement « sphérique » ou cylindro-conique à auto-alignement). La « liaison optique » entre les extrémités des fibres est assurée par une goutte de liquide de même indice que celui du cœur des fibres.

De tels dispositifs sont dès à présent disponibles sur catalogue. (Souriau, Socapex,...).

2.3. Câbles optiques.

Il suffit d'avoir vu une fois à l'œuvre les équipes chargées de « tirer » les câbles téléphoniques pour être persuadé que les structures porteuses des fibres optiques élémentaires devront être particulièrement soignées. Il est en effet primordial d'isoler les fibres de toutes contrainte ou traction.

Pour cela, les fibres doivent être libres dans la ou les gaines assurant les propriétés mécaniques indispensables à la mise en place des câbles.

Les connexions des extrémités ne doivent en aucun cas transmettre les efforts et tensions aux fibres.

Les industriels concernés (C.L.T.O.,...) proposent une panoplie de structures porteuses dont nous donnons quelques exemples sur la fig. 7.

C'est le câble rainuré à 7 conducteurs qui a été choisi pour la première liaison entre deux centraux téléphoniques (Tuileries - Philippe-Auguste à Paris) et le câblage de Biarritz.

2.4. Caractérisation des liaisons.

L'évaluation du rendement global d'une liaison est *a priori* un problème élémentaire.

Il suffit de comparer les niveaux des signaux à l'émission et à la réception en bout de ligne.

Lorsque l'on dispose, à proximité immédiate, des deux extrémités de la fibre, la solution est triviale.

Le problème se pose de toute autre façon lorsque les extrémités sont distantes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers de mètres.

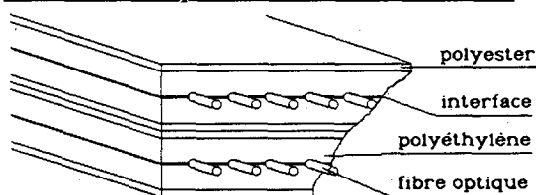
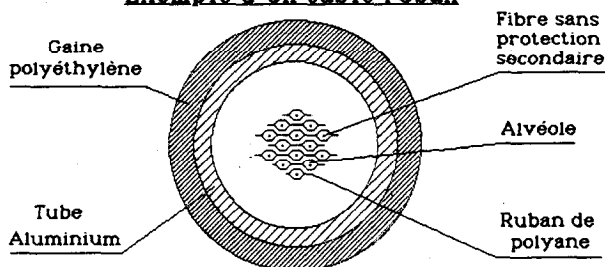
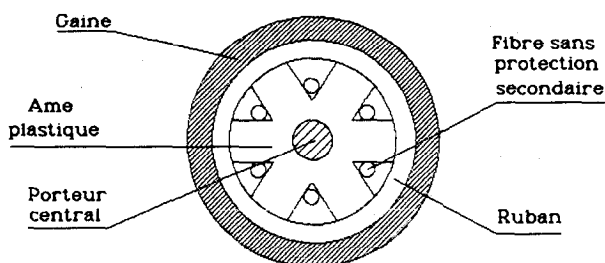
Vue schématique d'une structure ruban**Exemple d'un câble ruban****Élément de câble à structure cylindrique rainurée**

Fig. 7

D'autre part, les lignes étant en quasi totalité souterraines, on doit être en mesure de localiser les défauts (courbure excessive) voire les ruptures, à distance et ce avec une incertitude de quelques mètres seulement pour ne pas avoir à procéder à des travaux de terrassement trop importants.

2.4.1. Principe.

On utilise le fait que les pertes dans les fibres sont essentiellement dues à la diffusion de la lumière par les micro-défauts de structure : chaque élément de longueur de la fibre réémet

ainsi une fraction du flux incident vers la source. Il s'agit donc de rétrodiffusion.

Il suffit donc d'injecter, à l'instant $t = 0$, une impulsion brève et de forte énergie à une extrémité de la fibre, puis d'observer à partir de cette même extrémité le signal retour rétrodiffusé par les éléments de fibre. A la date t , le signal de retour à

l'extrémité de la fibre a parcouru la distance $z = \frac{ct}{2n}$ aller et

retour. Si l'on suppose que les micro-défauts, origine de la diffusion, sont uniformément répartis, la puissance optique rétrodiffusée recueillie à l'entrée s'obtient en appliquant la loi de Beer-Lambert :

$$P(t) = P_0 \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(X) dx \right] \quad \text{avec} \quad t = \frac{2nz}{c}.$$

La mesure de $P(t)$ permet donc de déterminer le coefficient moyen d'atténuation α , en amplitude.

L'intérêt de la méthode est qu'elle permet également d'étudier le comportement détaillé du coefficient d'atténuation α . En effet, toute variation de α par rapport à la valeur moyenne traduira la présence d'un défaut dans la fibre. Ces variations apparaîtront comme des variations de pente de la courbe de réponse, courbe qui, rappelons-le, est une droite dans un repère semi-log.

2.4.2. Méthode.

Une source lumineuse de forte puissance (laser, diode laser,...) émet des impulsions, de quelques ns à quelques dizaines de ns de large régulièrement espacées dans une branche d'une fibre en Y couplée à la fibre à étudier.

On recueille à l'extrémité de la deuxième branche du Y les impulsions échos rétrodiffusées dans la fibre (fig. 8 a).

L'amplitude de ces impulsions échos décroît linéairement (dans un repère semi-logarithmique) dans le temps, donc en fonction de la distance parcourue (aller et retour) dans la fibre.

Des variations plus ou moins brutales de la pente de cette droite traduisent la présence de zones de plus faible transmission. Zones 1 des fig. 8 a et 8 b.

En revanche, une épissure comme celle schématisée en 2 sur la fig. 8 a provoque une augmentation brutale de l'amplitude des échos (réflexion partielle sur les faces des fibres en regard)

suivie d'une chute tout aussi brutale de l'amplitude des échos suivants (zone 2 fig. 8 b).

Une rupture de la fibre produit un signal retour de forte amplitude puisqu'il y a réflexion sur un dioptré silice/air. (Zones 3 des fig. 8 a et 8 b).

Réflectométrie sur fibres

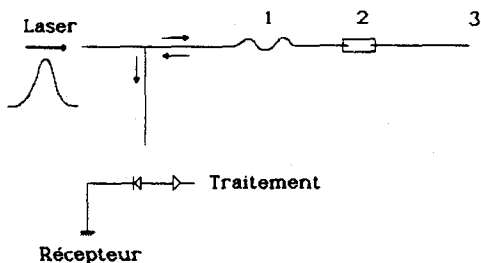
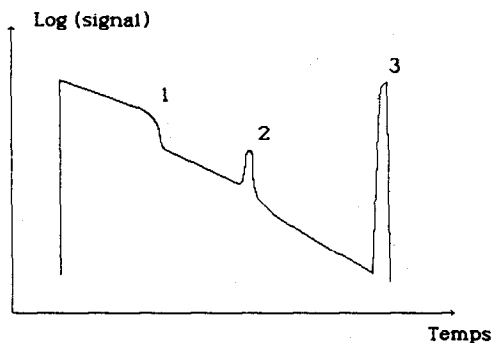


Fig. 8 a.



(10 us $\rightarrow$ 1 Km)

Fig. 8 b.

2.4.3. Analyse du fonctionnement.

Le graphe de la fig. 9 donne les ordres de grandeur des signaux en présence.

Si P_0 est la puissance émise il y a, dès le départ, une perte de 14 dB due au couplage et aux réflexions sur la face d'entrée de la fibre.

Les échos provenant des premières longueurs de la fibre testée présentent une perte d'environ 46 dB par rapport à la

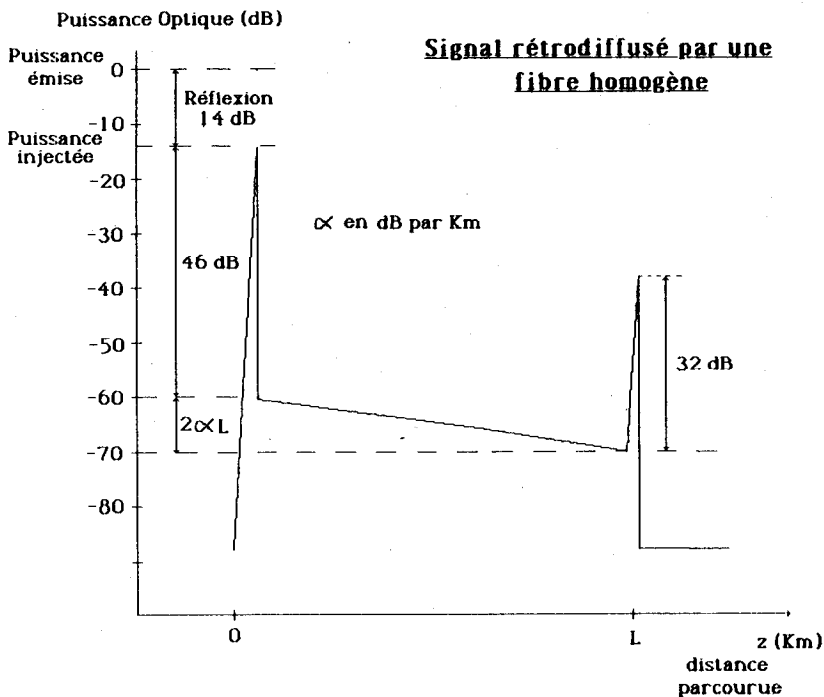


Fig. 9

puissance effectivement injectée. Ceci est dû à la faible valeur des taux de rétrodiffusion.

Le graphe présente ensuite une variation linéaire de pente α (en dB/km) caractéristique de la propagation dans une fibre homogène exempte de défauts.

L'extrémité de la fibre est caractérisée par la présence d'un écho retour de forte amplitude.

2.4.4. Difficultés.

Il ne faut pas se laisser abuser par l'allure du graphe de la fig. 9. En effet, l'écho le plus intense que l'on puisse obtenir, par réflexion sur l'extrémité de la fibre, est environ 1000 fois plus faible que le signal injecté. Quant aux échos provenant d'éléments éloignés de la fibre, ils sont, quant à eux, un million de fois plus faibles.

On conçoit donc que le premier problème qui se pose est d'isoler les très faibles signaux retour du bruit engendré par

le signal origine en raison de la diaphotie présente dans la fibre en Y.

On utilise bien évidemment les techniques les plus évoluées du traitement du signal, auto et intercorrélation entre autres.

On peut également polariser les impulsions lumineuses émises. Dans ce cas, comme les impulsions lumineuses rétrodiffusées sont presque totalement dépolarisées, il est facile d'isoler les signaux retour, non polarisés, du bruit qui est lui, constitué d'impulsions lumineuses polarisées.

2.4.5. Appareillages - Résultats.

Les appareils dès à présent disponibles sont généralement réalisés à partir d'un oscilloscope rapide (plusieurs centaines de mégahertz), numérique.

Un tiroir spécialisé assure le traitement des signaux. Les courbes, semblables à celles de la fig. 8 s'affichent directement sur l'écran ; les axes sont gradués en dB et en mètres.

La présence d'une « loupe électronique » permet de dilater une zone intéressante assurant ainsi une analyse plus précise des défauts.

La précision et la sensibilité de ces dispositifs sont remarquables puisqu'ils permettent d'évaluer des pertes infimes (des fractions de dB par km) et de localiser les défauts à quelques mètres près sur des distances de plusieurs kilomètres.

CONCLUSION.

Pour apprécier à leur juste valeur les progrès accomplis tant dans les laboratoires que dans l'industrie, il faut se souvenir que la faisabilité de fibres optiques utilisables en télécommunications n'a été démontrée qu'il y a une douzaine d'années.

Au cours de cette brève période on a réussi à mettre au point non seulement la fabrication industrielle des fibres mais aussi et surtout l'ensemble des éléments qui permettent de les exploiter.

De nombreuses liaisons expérimentales, puis commerciales, ont déjà été réalisées et le projet de câble optique transatlantique est maintenant bien avancé. Pour de telles liaisons à grande distance, l'emploi de fibres monomodes est indispensable. Leur technologie commence à être bien maîtrisée, mais l'on conçoit cependant que leur utilisation pose des problèmes encore plus délicats que ceux que l'on rencontre avec les fibres multimodes, notamment en ce qui concerne la connectique.
