

LES FIBRES

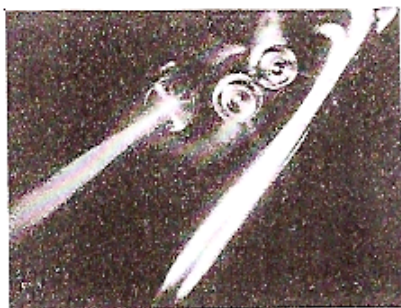


I

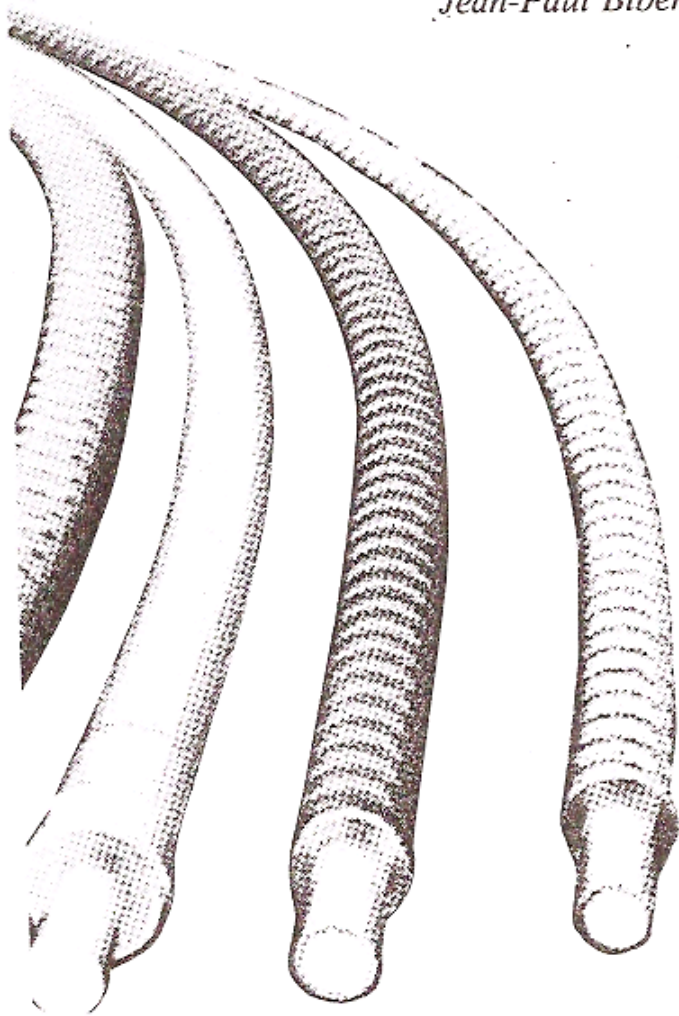
l y a vingt ans, aucun expert n'aurait osé prédire une optiques. Depuis, leur capacité de transmission a été de près de 10 000 ! Sujet de grand intérêt, dont numérique sont déjà très largement répandues, il n'est critique. S'il est vrai que la transmission optique résout de nombreux problèmes (insensibilité au rayonnement électromagnétique...), il serait tout s'agit là d'une panacée. Tout comme pour les câbles, il existe optiques, toute une hiérarchie de qualité. Aussi était-elle une technologie sous un angle très didactique et spécifique de ce vecteur de communication.

OPTIQUES

... telle évolution des fibres multipliée par un facteur... les applications à l'audio... reste pas moins un sujet... eux problèmes (isolation, ... tefois naïf de croire qu'il... également pour les fibres... l'essentiel d'aborder cette... ie afin de mieux cerner la... munication dont l'usage... va cesser de se répandre...



Jean-Paul Biberian



L'utilisation de l'optique comme moyen de communication à distance est très ancien (il remonte probablement aux débuts de l'âge du feu, avec l'utilisation de signaux de fumée) et s'est développé avec, par exemple, l'emploi de lampes entre bateaux en mer.

Cependant, les premiers systèmes pratiques de communication optique ont commencé avec les brevets déposés par Alexander Graham Bell en 1880. Le photophone permettait de communiquer à une distance de 200 mètres. La figure 1 décrit schématiquement un tel système. Un rayon de lumière, par exemple le soleil, est réfléchi par un diaphragme mobile relié à un cornet recevant le signal sonore. Le rayon lumineux modulé par le diaphragme est reçu par une cellule au sélénium qui transforme les variations de lumière en courant électrique variable restituant les sons par l'intermédiaire d'un haut-parleur !

Comme on le voit, ce concept préfigurait déjà les futurs systèmes de transmission optique modernes.

Une des limitations du brevet de Bell était l'atténuation du signal optique avec la distance qui limitait la portée du procédé.

L'idée d'utiliser des guides de lumière pour éviter l'atténuation des signaux provenant de la distance et des conditions atmosphériques n'est pas nouvelle. En 1870, John Tyndall a montré que la lumière pouvait être guidée dans des jets d'eau. L'expérience qu'il réalisa est décrite dans la figure 2.

Cette technique a été utilisée depuis dans la réalisation de fontaines lumineuses.

Cependant, deux événements importants ont permis à la fibre optique de se développer comme moyen de communication : le premier a été la mise au point du laser en 1960, permettant de

Documents photographiques : fibres Schott.

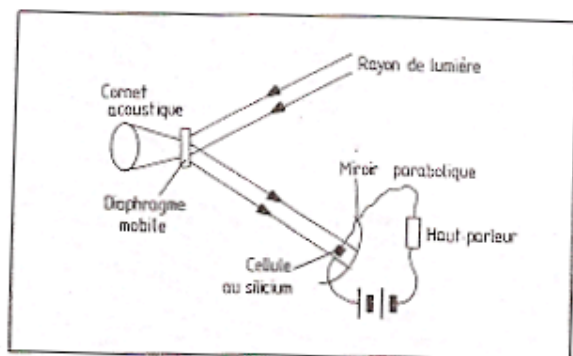


Fig. 1 : Photophone de Bell en 1880, l'un des premiers systèmes de communication optique. Le rayon de lumière est modulé par le cornet acoustique. Il est recueilli par une cellule au sélénium qui excite un haut-parleur.

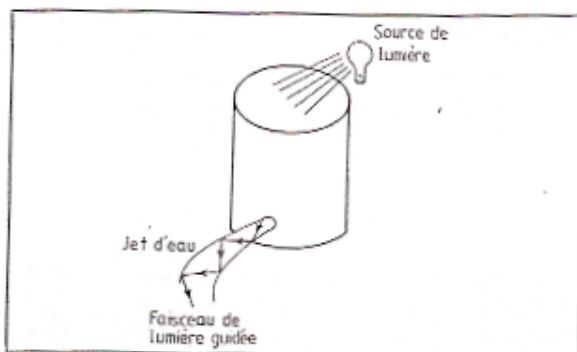


Fig. 2 : Dès 1870, John Tyndall montrait que la lumière pouvait être guidée par un jet d'eau. C'est ce principe qui, depuis, a été repris dans les fontaines lumineuses.

fabriquer des sources de lumière intenses et monochromatiques. C'est-à-dire d'une seule longueur d'onde. Le deuxième a été un calcul théorique fait par C. Kao et G.A. Hockham en 1966 montrant que les fibres optiques pouvaient concurrencer les câbles coaxiaux utilisés dans le domaine des communications si on pouvait fabriquer des fibres qui laisseraient passer au moins 1% du signal reçu après un kilomètre. Il faut savoir qu'à l'époque celles-ci n'étaient capables de transmettre que 0,01 % ! On était loin du compte. A ce moment-là aucun expert des matériaux n'aurait prédit qu'une telle chose soit possible. La figure 3 montre l'évolution de la transmission des fibres optiques au cours des 20 dernières années. Les progrès sont surprenants.

La réalisation de fibres avec une très faible perte de transmission, et les avantages apportés par la grande quantité d'informations transmises par une seule fibre ont permis l'explosion de ce moyen de communication au cours des dernières années.

Pourquoi les fibres optiques ?

Avant de voir plus en détail le fonctionnement des fibres optiques, il est utile de rappeler les avantages qu'elles apportent par

rapport aux autres systèmes de communication. Ceci nous permettra de comprendre leur développement spectaculaire dans de nombreux domaines et en particulier dans celui de l'audio.

Le spectre électromagnétique

En physique, on définit une onde électromagnétique par sa longueur d'onde ou d'une manière équivalente par sa fréquence. Des ondes qui nous paraissent différentes telles que la lumière, les ondes radios ou les rayons X sont en réalité un même phénomène physique, c'est à dire une onde électromagnétique. Ce qui les différencie est seulement leur longueur d'onde ou leur fréquence. Ce qui fait qu'elles nous paraissent dif-

férentes, c'est qu'elles sont produites et détectées avec des moyens différents. La figure 4 donne une représentation du spectre électromagnétique depuis les longueurs d'ondes les plus faibles (les fréquences les plus élevées) correspondant aux rayons gamma jusqu'aux longueurs d'ondes les plus grandes (les fréquences les plus basses) correspondant aux ondes radios. Entre les deux on trouve : les rayons X, les lumières ultraviolettes, visibles et infra-rouges, enfin les micro-ondes.

La bande passante

Quand on veut transporter une information (que celle-ci soit analogique ou digitale ne change pas beaucoup le raisonnement, mais pour simplifier, nous supposons qu'elle est analogique), ceci se traduit par un signal ayant une fréquence maximale. Si on utilisait le signal directement on ne pourrait transmettre qu'une information à la fois, un peu comme dans votre ligne téléphonique qui relie votre poste au central téléphonique. Si vous voulez rajouter une deuxième ligne, il faut physiquement une deuxième paire de fils.

En téléphonie, on se contente d'une bande de fréquence de 3,5 kHz environ, alors qu'en audio, on a besoin de 20 kHz. Pour faire passer plusieurs infor-

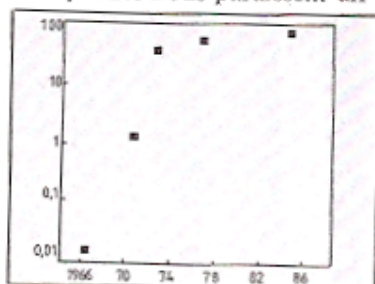


Fig. 3 : L'extraordinaire progrès des fibres optiques. En l'espace de vingt ans, la capacité de transmission d'une fibre a été multipliée par un facteur de près de 10000 ! En ordonnée, pourcentage du signal reçu après 1 km.

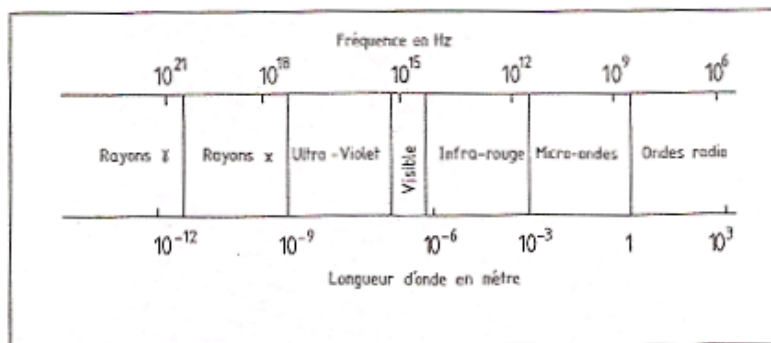


Fig. 4 : Le spectre électromagnétique. La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 μm .

mations sur le même câble ou moyen de communication (onde radio, ou optique), on utilise une porteuse à haute fréquence. Plus cette fréquence sera élevée, plus on pourra passer simultanément plusieurs signaux, chacun occupant une bande de fréquence de 20 kHz par exemple. C'est pour cela qu'en radio dans la bande des grandes ondes, aux environs de 1 000 à 2 000 mètres, ce qui correspond à des fréquences de 200 à 350 kHz environ, on ne peut pas placer de nombreux émetteurs. Par contre, dans la bande F.M. qui se situe vers 100 MHz, on peut placer beaucoup plus de stations de radio. D'ailleurs en télévision, où la qualité d'informations à transmettre est beaucoup plus grande, les fréquences utilisées sont encore plus élevées. La télévision couleur avec les procédés actuels couvre une bande de fréquence de 5 MHz environ. La télévision Haute définition, elle, utilisera une largeur de bande encore plus grande, ce qui fait que l'on rentre dans le domaine des gigahertz, et là les ondes radios sont de plus en plus directives, et se rapprochent du comportement de la lumière visible. Seuls les satellites de télécommunication en vision directe permettent d'y arriver par voie hertzienne.

Par contre, comme on peut le voir sur la figure 4, la lumière est

à une fréquence un million de fois supérieure aux ondes radios, permettant ainsi la transmission de beaucoup plus d'informations. Il est intéressant de remarquer que les télécommunications intercontinentales se faisaient il y a vingt ans par câble sous-marin coaxial, ne permettant pas de passer un grand nombre de communications simultanément, à cause de l'impossibilité de faire passer de très hautes fréquences dans un câble. L'avènement du satellite a jeté aux oubliettes les câbles coaxiaux, car ceux-ci travaillent dans la gamme des gigahertz. Par contre, le développement des fibres optiques vient de redonner un concurrent aux satellites, en proposant une alternative économique rentable.

Nous venons donc de voir que plus la fréquence du signal porteur de l'information est élevée, plus la quantité d'informations transmissibles est grande. C'est une des raisons de l'attrait de l'optique comme moyen de communication.

Isolation et protection électromagnétique.

En électronique, les boucles de courant, et la sensibilité aux perturbations électromagnétiques externes sont un problème majeur. Les boucles de courant sont dues au fait que les différents éléments d'une chaîne élec-

tronique, que ce soit au niveau d'un ensemble ou d'un sous-ensemble, sont sensibles non seulement comme prévu par ce qui se passe en amont, mais aussi par l'aval. Ceci provient du fait que même si physiquement les éléments sont découplés, il y a toujours un risque d'influence par rayonnement. Il est d'ailleurs d'autant plus difficile d'assurer une protection contre le rayonnement que les fréquences dont on veut s'affranchir sont à basse fréquence. Plus les fréquences sont basses et plus la pénétration est grande. Nous n'entrerons pas ici dans l'explication détaillée du mécanisme en question, mais toutes les personnes qui ont fait de l'électronique connaissent le problème du 50 Hz présent partout ! De même en voiture, il est plus facile de recevoir les grandes ondes que la FM. Les militaires utilisent cet effet pour communiquer avec les sous-marins en plongée : ils emploient des émetteurs de très basse fréquence qui arrivent à passer sous l'eau !

Les fibres optiques sont un moyen de s'affranchir complètement de ces deux problèmes. On peut donc complètement dissocier les signaux électriques par une fibre optique, tout en transmettant l'information.

Les principes de base

Avant d'aller dans le détail du fonctionnement d'une fibre optique, nous allons revoir (ou voir), quelques principes de base de l'optique géométrique.

Nous avons parlé jusqu'ici de la lumière comme onde électromagnétique, alors que nous allons la considérer maintenant sous un autre angle, comme un rayon qui se propage, c'est aussi l'aspect corpusculaire.

Ces deux aspects : onde et particule sont permanents dans la nature, et sont décrits par la mécanique quantique. Nous n'allons pas rentrer dans ce domaine hautement délicat de la

physique, mais il est important de noter qu'un aspect ou l'autre est prépondérant suivant les dimensions dans lesquelles se propagent les ondes. Par exemple, si la lumière est dans une « boîte » dont les dimensions sont de l'ordre de grandeur et de la longueur d'onde de la lumière en question, celle-ci doit être considérée comme une onde. Par contre, si la boîte est grande par rapport à la longueur d'onde, on peut la considérer comme des particules obéissant au lois de la mécanique classique, c'est-à-dire dans ce cas l'optique géométrique.

La lumière visible étant comprise entre 0,4 et 0,7 microns, la majorité des phénomènes que nous observons sont décrits par l'optique géométrique.

Rappels d'optique géométrique

La lumière se propage dans le vide à la vitesse « c » qui est de 300 000 km/s. Par contre, dans un milieu matériel, à cause de l'interaction de l'onde électromagnétique avec lui, la vitesse est inférieure. On appelle « n » indice de réfraction du milieu, le rapport entre « c » la vitesse de la lumière dans le vide, et « v » cette vitesse dans le milieu :

$$n = c/v$$

Dans l'air cet indice est très voisin de 1, tandis que dans l'eau, il vaut 1,33, et que dans les verres, il peut varier entre 1,44 et 1,9.

Dans un milieu homogène, la lumière se déplace en ligne droite. Mais quand elle rencontre une variation d'indice elle change de direction. Un exemple bien connu d'effet de l'indice de réfraction est celui qui produit les mirages lorsque la température de la chaussée est élevée. La figure 5 décrit le phénomène.

L'air au-dessus de la route a une température qui décroît avec la distance au sol, la densité de

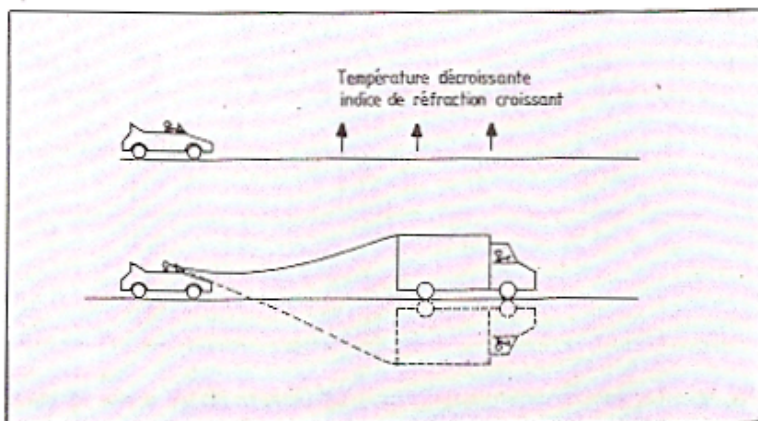


Fig. 5 : Principe de l'effet de mirage. La variation de température s'accompagne d'une variation d'indice de réfraction ayant pour effet de courber les rayons lumineux provenant de l'objet vu par l'observateur.

l'air augmente donc, et l'indice de réfraction augmente également avec la hauteur par rapport au sol. Les rayons lumineux provenant du camion sont courbés au cours de leur trajet, mais le conducteur de la voiture a l'impression de voir toujours en ligne droite, il croit donc que le camion est à l'envers. Cela lui donne l'impression d'une réflexion dans un miroir, comme si la route était mouillée.

Nous venons de voir un cas très pratique, mais un peu complexe d'indice de réfraction ayant une variation continue. Les lois qui décrivent une telle situation sont relativement complexes. Le cas d'école est celui du

changement brutal d'indice de réfraction. La figure 6 décrit le cas général où un rayon lumineux interagit avec la surface séparant deux milieux d'indices différents : « ni » et « nt ». Le rayon incident atteint la surface avec un angle incident θ_i , d'une part il se réfléchit avec un angle θ_r , et d'autre part, il est transmis avec un angle θ_t . Les lois de Descartes qui décrivent cette expérience sont les suivantes :

a) L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence :

$$\theta_i = \theta_r \quad (1)$$

b) L'angle de réfraction est relié à l'angle incident par la relation :

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2)$$

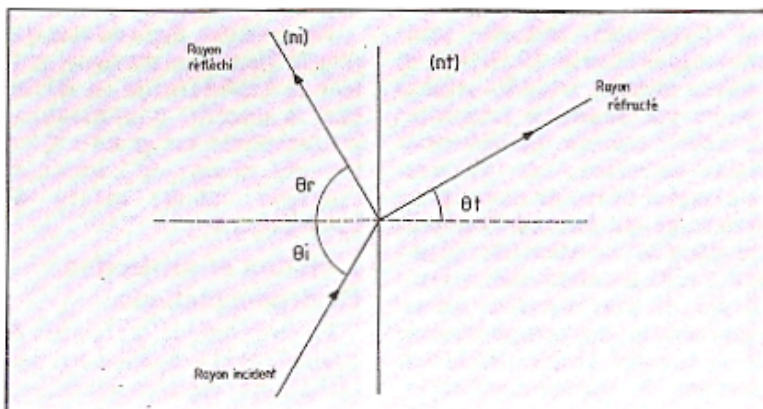


Fig. 6 : Un rayon incident parvenant sur une surface séparant deux milieux d'indices différents se trouve dédoublé en un rayon réfléchi et un rayon réfracté selon des angles décrits par les lois de Descartes. Ici $n_t > n_i$.

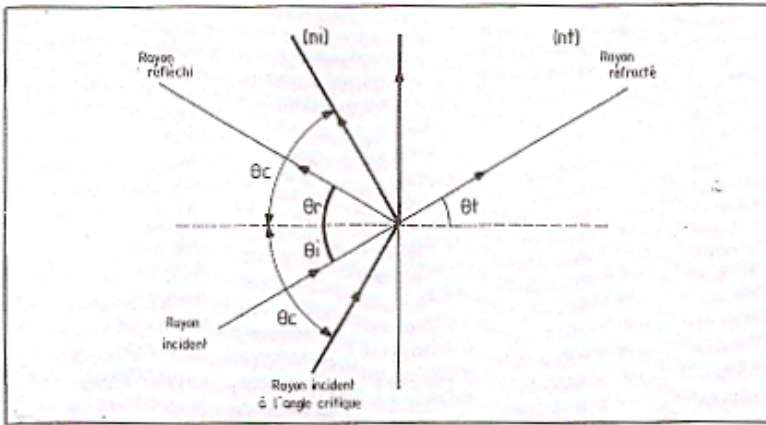


Fig. 7 : Lorsque $n_i > n_t$, il y a un angle critique au-delà duquel il n'y a plus de rayon réfracté. Le rayon incident est réfléchi intégralement et ne sort pas du milieu d'indice n_i . C'est ce principe qui est utilisé dans les fibres optiques.

La première loi est la loi de réflexion, et la deuxième, la loi de la réfraction. On voit donc que plus l'indice est élevé, plus la lumière se déplace près de la verticale. Le schéma de la figure 6 correspond au cas où $n_t > n_i$. La figure 7 montre le cas inverse où $n_i > n_t$.

Dans ce cas, il y a un angle critique au-delà duquel aucune transmission n'est possible, nous sommes dans le cas de la réflexion totale. Pour trouver la valeur de cet angle critique, il suffit de prendre le cas où $\theta_r = 90^\circ$. On obtient alors :

$$\sin \theta_c = n_t / n_i$$

où θ_c est l'angle critique au-delà duquel, il n'y a plus de transmission, tout le faisceau lumineux incident est réfléchi, sans perte. Nous allons utiliser ces lois de base pour comprendre le fonctionnement des fibres optiques.

Application aux fibres optiques

La loi de la réfraction nous permet de comprendre l'expérience du jet d'eau de la figure 2, puisque l'indice de l'eau est supérieur à celui de l'air il existe un angle critique d'incidence au-delà duquel les rayons lumineux ne peuvent pas sortir. La lumière se propage donc dans le jet

d'eau.

Ce même principe est utilisé dans le cas des fibres optiques. La figure 8 donne une vue schématique d'une fibre composée d'une âme de verre ou de plastique d'indice élevé, entouré d'une gaine d'indice plus faible. L'ensemble est protégé par une gaine plastique. Ce type de fibre a une allure de marche du point de vue de la variation d'indice, comme on le voit sur la figure 8.

Ce type de fibre présente un grave inconvénient, car les rayons lumineux qui se déplacent avec des angles d'incidence différents vont parcourir des trajets de longueurs différentes. Puisque la fibre est homogène, il en résulte que les temps de propagation seront différents selon les trajets optiques suivis. C'est à dire que si une impulsion de lumière est envoyée à l'entrée de la fibre, elle sera étalée dans le temps à l'arrivée à l'autre extrémité. Il y aura d'une part affaiblissement du signal, et d'autre part, limitation de la fréquence maximale transmissible dans la fibre. La figure 9 décrit ce phénomène.

On voit sur la figure que le rayon lumineux se déplaçant le long de l'axe de la fibre va parcourir une distance inférieure à celui réfléchi sur la gaine.

Nous avons vu dans le cas du

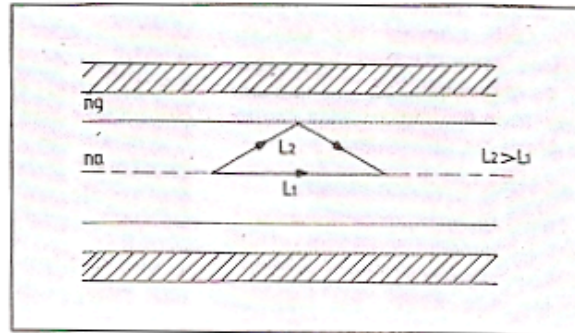
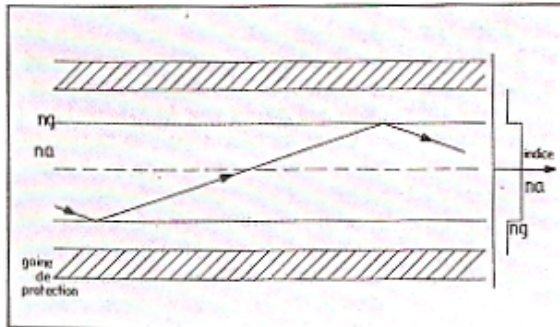


Fig. 8 : Vue schématique d'une fibre composée d'une âme de verre entourée d'une gaine d'indice inférieur. La rupture d'indice est brutale, en forme de marche.

Fig. 9 : Les fibres à rupture d'indice brutale présente un grave inconvénient : le rayon se propageant dans l'axe va parcourir une distance inférieure à celui réfléchi par la gaine. Il s'en suit un affaiblissement ainsi qu'une limitation en fréquence maximale de transmission.

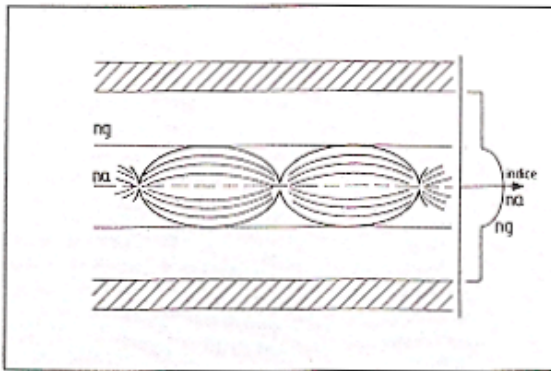


Fig. 10 : Fibre à indice variable. On passe progressivement de l'indice n_a à l'indice n_g . Les trajets de l'onde se trouvent courbés et bien qu'ils aient des longueurs différentes, les temps de propagation restent les mêmes car la vitesse varie avec l'indice. Les défauts de la fibre décrite en fig. 9 sont ainsi contournés.

mirage de la figure 5, qu'il pouvait y avoir réflexion dans un milieu d'indice variable. On réalise alors une structure où l'âme est fabriquée avec un matériau d'indice variable. Sans entrer dans le détail de fabrication d'une telle fibre, on peut trouver deux cas : celui où la fibre est constituée d'anneaux concentriques comme les arbres, chaque anneau ayant un indice légèrement différent du précédent, ou un indice variant continûment le long des rayons. On démontre que si le profil de l'indice le long du rayon est parabolique, alors les trajectoires des rayons lumineux sont des sinusoides. Les trajets sont de longueur différentes, mais comme les vitesses varient avec l'indice, les temps de propagation sont les mêmes pour tous les rayons. La figure 10 décrit un tel système.

Les fibres monomodes

Nous avons vu précédemment que la lumière avait aussi un caractère ondulatoire, c'est également une onde. La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 microns. Si les fibres ont une dimension transversale de quelques microns, un nouveau phénomène apparaît, c'est la possibilité d'avoir des résonances

transversalement, un peu comme pour une corde de guitare. On aura des ventres et des nœuds de lumière. D'un point de vue énergétique, nous avons alors une perte, car une partie de la lumière va se propager dans ce que l'on appelle des modes différents. L'idée consiste à fabriquer des fibres très fines qui n'autorisent que le passage d'un seul mode. Il ne peut plus y avoir de mode transverse. Il n'y a plus qu'un ventre au centre de la fibre et un nœud sur la périphérie.

Alors qu'une fibre multimode peut avoir un diamètre de 50 microns, les fibres monomodes sont beaucoup plus fines de l'ordre du micron. Technologiquement, elles sont plus difficiles à réaliser et surtout à aligner lorsque l'on veut en raccorder deux entre elles.

L'avantage des fibres monomodes est cependant important puisqu'elles ont moins de perte au cours de la propagation.

Atténuation des fibres optiques

Plusieurs facteurs interviennent pour limiter la transmission des fibres optiques :

- Vers les courtes longueurs d'onde, c'est à dire le visible et l'ultra-violet, ce sont les bandes d'absorption et la diffusion par

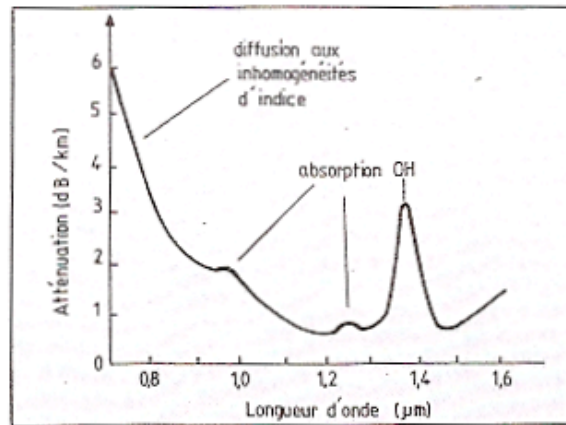


Fig. 11 : Spectre d'atténuation en dB/km en fonction de la longueur d'onde du rayon lumineux. (On notera les pics d'absorption dus aux liaisons oxygène-hydrogène résonnant à ces longueurs d'onde.

les inhomogénéités d'indice.

- Vers les grandes longueurs d'onde, c'est l'absorption infra-rouge.

La figure 11 montre la variation du coefficient d'atténuation en décibel par kilomètre en fonction de la longueur d'onde.

Les sources et les détecteurs de lumière

Les sources de lumière

Les diodes électroluminescentes ou LED (light emitting diode) sont maintenant d'usage courant et se retrouvent dans de nombreux appareils domestiques. C'est une source de lumière d'une grande simplicité d'emploi et très fiable. Son principe est décrit sur la figure 12.

Comme leur nom l'indique, ce sont des matériaux semi-conducteurs par exemple de l'arséniure de gallium, dopés de telle façon que la conductibilité soit due aux électrons (zone dopée "n"), ou aux trous, c'est à dire à l'absence d'électrons (zone dopée "p"). Le plan d'interface est appelé une jonction. Lorsque l'on fait passer un courant à l'intérieur de la diode ainsi formée, elle émet de la lumière due à la recombinaison entre élec-

trons et trous. La longueur d'onde d'une telle radiation dépend de la différence d'énergie entre les électrons de la zone "n" et les trous de la zone "p". Cependant la largeur de la bande émise est large comparée à celle des diodes laser.

Les diodes laser fonctionnent sur un principe semblable, mais avec un courant beaucoup plus élevé. Dans ce cas, l'émission devient cohérente. Alors que les LED fonctionnent quel que soit le courant, les diodes laser ont un seuil de fonctionnement. Si le courant est insuffisant, il n'y a pas d'émission. Celle-ci est facilitée par la fabrication de miroirs qui réfléchissent une partie du rayonnement à l'intérieur de la jonction pour accroître l'effet de stimulation. Les diodes laser ont une bande d'énergie très étroite.

Les récepteurs de lumière

Les récepteurs de lumière sont des photo-diodes ou des photo-transistors qui fonctionnent sur le principe inverse de celui décrit pour les émetteurs de lumière. La radiation lumineuse crée une paire d'électrons trous qui sont recueillis aux bornes de la diode, et qui se traduit par un courant proportionnel à la quantité de lumière reçue.

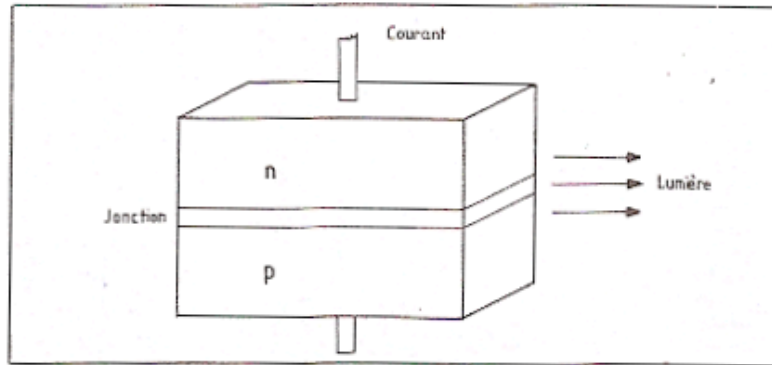


Fig. 12 : Schéma de principe d'une LED. A la jonction des zones dopées n et p, lorsqu'un courant le traverse, il y a recombinaison entre électrons et trous s'accompagnant d'une émission lumineuse.

Les applications audio

Bien que les fibres optiques permettent de transmettre aussi bien des signaux analogiques que digitaux, on les utilise seulement en mode digital. Avec l'arrivée du disque compact et des DAT, leur emploi devient de plus en plus fréquent pour relier lecteur et convertisseur. Cela entraîne un très gros avantage au point de vue de l'isolation électrique, comme nous l'avons vu au début de cet article.

Il faut néanmoins être prudent, toutes les fibres n'ont pas la même qualité. Il est important de choisir de bons matériaux et techniques. Si la fibre est

d'indice constant, il y aura une limitation dans la bande de fréquence. Si la qualité n'est pas bonne, il y aura atténuation des signaux, et difficulté à mesurer les signaux. Dans tous les cas, les connecteurs doivent être de bonne qualité, car le couplage n'est pas nécessairement facile entre les fibres.

Conclusion

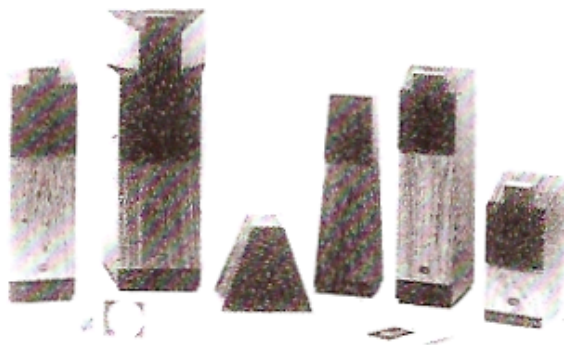
Les fibres optiques ont acquis droit de cité dans le monde industriel et domestique, le domaine de l'audio devrait suivre rapidement au vu des avantages que cette technologie apporte.

*De la musique
avant toute chose...*

confluence

*... Et tout le reste
est littérature*

Documentations, bancs d'essai, liste des revendeurs et tous renseignements à :



Le Roudier - B.P. 29 24110 SAINT-ASTIER
Tél. 53 54 05 55 Fax : 53 04 49 45

Minitel 36-16 code Hifitel