

## 3 FIBRES OPTIQUES

### 3.1 Présentation générale

Les premières expériences de transmission optique d'informations datent du 19<sup>ème</sup> siècle mais il a fallu attendre la découverte du laser (1960) et la maîtrise des diodes laser à semi-conducteurs pour envisager son application. Les premières liaisons de télécommunication commerciales datent de 1980. La maîtrise de l'amplification optique puis du multiplexage en longueur d'onde a permis en 1990 de répondre aux besoins de capacité due aux développements de l'Internet.

Les fibres optiques sont aujourd'hui une technologie à maturité, environ 100 millions de kilomètres sont fabriqués par an.

Les avantages des fibres optiques sont nombreux :

#### Au niveau de la transmission

Les fibres optiques ont une très faible atténuation et une très grande bande passante. De nombreux signaux peuvent circuler sur la même fibre grâce au multiplexage en longueur d'onde. Les systèmes de portée et de capacité sont très supérieurs à celles des câbles conducteurs ou de la radio.

#### Au niveau de la mise en œuvre

Les fibres optiques sont de très petites tailles, elles ont un poids très faible et sont très souples. Elles sont insensibles aux parasites électromagnétiques et sont très sûres électriquement (l'isolation totale entre les terminaux). Les puissances optiques utilisées sont faibles donc non dangereuses.

#### Au niveau économique

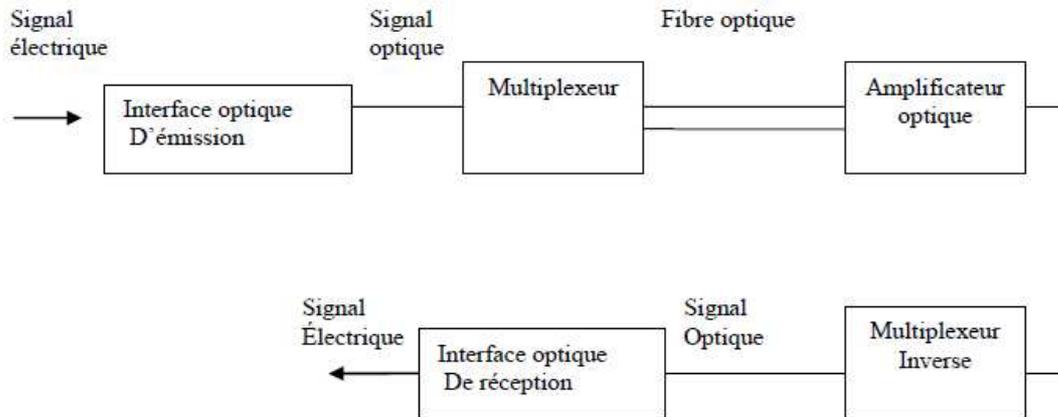
Le coût global d'un système sur fibres optiques est, dans de nombreux cas, inférieur à celui sur câbles conducteurs.

Les différents domaines d'utilisation sont nombreux en télécommunication mais aussi dans un grand nombre d'applications industrielles.

En télécommunication, les fibres optiques sont utilisées pour les liaisons terrestres (urbaines, régionales, nationales et internationales) mais aussi pour les liaisons sous-marines comme les liaisons transatlantiques.

Ces applications industrielles sont variées, on distingue les télécommandes, les télémessures, la surveillance vidéo, les bus de terrain ou même pour interconnecter différentes cartes d'un système informatique. Les fibres optiques sont de plus en plus présentes dans l'instrumentation optique.

Un système de transmission sur fibre optique est présenté sur la figure suivante :



En émission, l'interface optique constituée d'une diode électroluminescente (DEL) ou diode laser (DL), permet de transformer le signal électrique en un signal optique. Celui ci peut être multiplexé en longueur d'onde pour permettre à plusieurs signaux d'être envoyés dans la fibre optique.

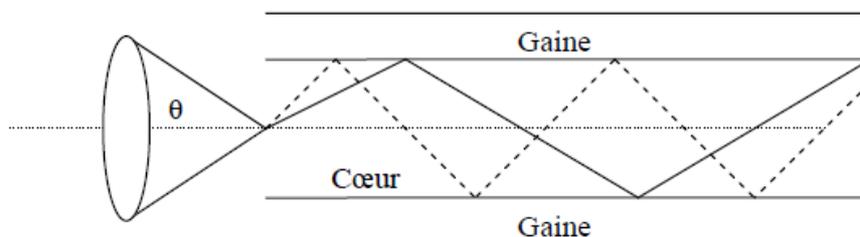
A la réception, le signal optique est amplifié, démultiplexé et transformé par une photodiode en signal électrique.

Le cœur, fil de verre très fin, d'un seul tenant, peut être parfois très long (quelques centaines de kilomètres). Lorsque la longueur de l'émission le nécessite, on doit insérer des répéteurs.

La plupart des transmissions sont en numériques mais il y a quelques applications analogiques dans les domaines de la vidéo ou des télémesures. La durée de vie d'une fibre optique est estimée à au moins 20 ans.

### 3.2 Principe de fonctionnement

Une fibre optique, minces cheveux de matériaux très transparents (verres ou lastique), est constituée d'un cylindre de verre très mince appelé cœur (quelques microns) d'indice  $n_1$  entouré d'une gaine également de verre d'indice  $n_2$ . Le tout est entouré d'une gaine extérieure de protection et d'un renfort pour rigidifier qui peut réunir plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fibres. L'indice de la gaine  $n_2$  est très inférieur à l'indice du cœur  $n_1$ .



La lumière doit rester confinée par une succession de réflexions totales. Il ne doit pas y avoir de rayon diffracté. Ce principe découle de la loi de Descartes sur la réfraction et la réflexion. Chaque matériau transparent possède un indice de réfraction qui permet d'évaluer la propagation de la lumière dans le matériau considéré.

$$n = c/v$$

$c$  est la célérité de la lumière,  $v$  est la vitesse dans le milieu considéré. Bien évidemment  $n$  est toujours supérieur à 1.

#### Loi de la réfraction

La loi de Descartes dit que le rayon incident issu d'un milieu d'indice de réfraction  $n_1$  qui arrive avec un angle  $\theta_1$  engendre un rayon diffracté d'angle  $\theta_2$  sur une surface d'indice de réfraction  $n_2$ , tel que  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ .

#### Loi de la réflexion

Quand il y a réflexion le faisceau réfléchi à un angle  $\theta'_1$  qui est de même valeur que l'angle d'incidence  $\theta_1$ .

L'angle critique  $\theta_c$  est calculé pour qu'il n'ait pas de rayon réfracté. Les rayons lumineux qui pénètrent dans la fibre optique seront complètement réfléchis si leur angle d'incidence est inférieur à  $\theta_c$ .

On appelle ouverture numérique noté  $ON$  la quantité  $\sin \theta_c$  tel que  $ON = \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2}$ .

On définit la différence d'indice relative  $\Delta$  par

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$\Delta$  varie typiquement de 0,1% à quelque %. Une fibre optique 50/125 possède un diamètre de cœur de 50  $\mu\text{m}$  et un diamètre de gaine de 125  $\mu\text{m}$ .

### **3.3 Les types de fibres optiques**

La fibre optique est un guide d'onde diélectrique, la propagation de la lumière se fait suivant des modes de propagation. On distingue les fibres monomodes et les fibres multimodes.

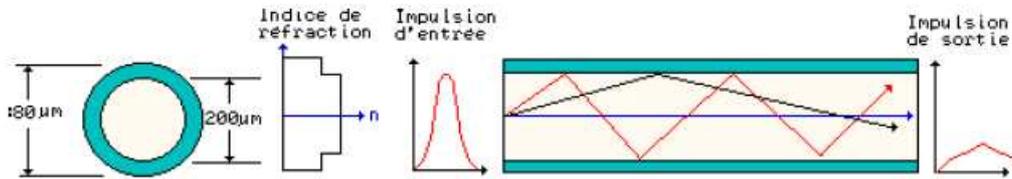
#### **3.3.1 Les fibres multimodes**

La fibre optique est multimode, pour une longueur d'onde donnée, plusieurs rayons lumineux peuvent s'y propager ; la lumière se répartit sur un certain nombre de trajectoires.

On rencontre principalement deux structures de fibres optiques suivant le type de profil d'indice. La fibre à saut d'indice et la fibre à gradient d'indice (le cœur possède un indice qui dépend de la position).

#### **- Fibre optique multimode à saut d'indice**

C'est le type de fibre le plus simple. L'indice du cœur  $n_1$  est constant, il est légèrement supérieur à  $n_2$ , indice de la gaine (différence de l'ordre de 1,5). Le diamètre du cœur est grand par rapport à la longueur d'onde, il permet à des rayons d'angles différents de se propager. L'angle maximum permis est donné par l'ouverture numérique  $ON = \sin \theta = (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2}$ .



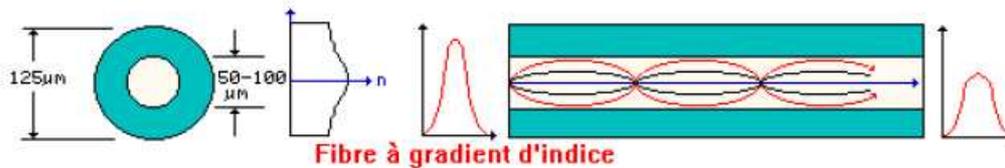
L'inconvénient de ce type de fibre résulte de l'écart important des temps de parcours des différents rayons lumineux, il existe donc un l'élargissement important de l'impulsion de départ.

On peut utiliser une source assez divergente comme une DEL, diode électroluminescente car une forte ouverture numérique permet de coupler une grande quantité de lumière.

Ces fibres conviennent bien aux transmissions à courte distance (réseaux locaux). La capacité de transmission de ce type de fibre est d'environ 100Mbits/s. Cette capacité est assez faible car chaque rayon doit parcourir une distance différente, il faut donc « attendre » que tous les faisceaux soient arrivés.

#### - Fibre optique multimode à gradient d'indice

Elles sont caractérisées par une variation progressive (forme parabolique) de l'indice du cœur  $n_1$ . L'indice du cœur est donc variable,  $n(r)$  est appelée le profil d'indice du cœur.



Fibre à gradient d'indice

La loi d'indice est de la forme :

$$n(r) = n_{10} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

$r$  est la position de la fibre par rapport à l'axe,  $n_{10}$  est l'indice au centre du cœur,  $a$  le rayon du cœur. La différence d'indice relative  $\Delta$  est définie par rapport à  $n_{10}$ .

$\alpha$  est le paramètre de profil d'indice,  $\alpha = 2$  pour un profil parabolique (le cas le plus fréquent),  $\alpha = 1$  pour un profil triangulaire et si  $\alpha$  tend vers  $\infty$ , le profil est à saut d'indice.

Le nombre de modes dans une fibre à gradient d'indice, caractérisé par le paramètre de profil  $\alpha$  est obtenu par la formule approchée :

$$M = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{V^2}{2}$$

Pour une fréquence réduite  $V$  le nombre de modes est plus faible dans une fibre à gradient d'indice que dans une fibre à saut d'indice ou  $M \approx \frac{V^2}{2}$  puisque  $\alpha$  tend vers  $\infty$ .

$V$  la fréquence réduite se déduit de la formule suivante :

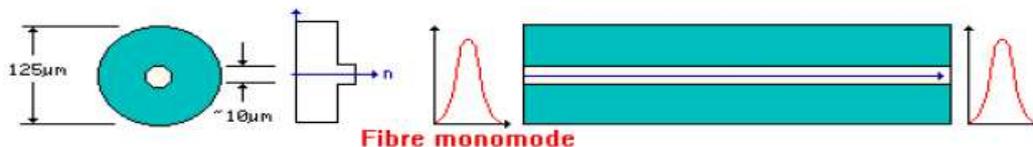
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

L'indice du cœur suit une loi d'allure parabolique donc les rayons suivent une trajectoire d'allure sinusoïdale.

Ces fibres conviennent bien aux transmissions à moyenne distance (réseaux locaux informatiques). La bande passante de ce mode de fonctionnement est de 500Mbits/s. Cette capacité est plus élevée que celle du saut d'indice car la distance à parcourir des rayons est plus faible, donc il est possible d'augmenter la fréquence.

### 3.3.2 Les fibres monomodes

La fibre optique est monomode, un seul mode peut se propager, il s'agit de la fibre la plus performante pour les télécommunications.



Le chemin de propagation est unique, direct et parallèle à la fibre. Le diamètre du cœur est faible (inférieur à 10  $\mu\text{m}$ ) ainsi que la différence d'indice (moins de 0,5%). Les dimensions typiques sont pour le diamètre du cœur 9 $\mu\text{m}$  et pour le diamètre de la gaine 50 $\mu\text{m}$ .

Un seul mode peut se propager pour une longueur d'onde donnée supérieure à  $\lambda_c$ , longueur de coupure du mode. La technique de multiplexage en longueur d'onde peut être utilisée pour transmettre plusieurs signaux sur une même fibre optique.

On ne peut utiliser comme source d'émission que des diodes lasers (plus chères).

Les avantages de ce type de fibre sont sa grande bande passante 1000Mbits/s qui permet la transmission à grande distance, une dispersion et une atténuation très faible. On retrouve l'impulsion en sortie non déformée car la dispersion modale est quasi nulle.

Le principal inconvénient est qu'elles reviennent plus chères car elles doivent être raccordées avec une grande précision.

### 3.4 Dispersion dans les fibres optiques

Tout signal injecté dans une fibre optique subit une déformation : c'est le phénomène de dispersion. La dispersion se traduit par un étalement temporel caractérisé par un temps de montée qui sera d'autant plus grand que la longueur est grande. Le temps de montée causé par la dispersion doit, bien sur, rester inférieur à la période  $T_b$  des signaux (débit de transmission  $R=1/T_b$ ).

Les fibres précédemment décrites présentent des comportements dispersifs très différents.

Les fibres multimodes possèdent une **dispersion intermodale**, qui a comme origine les différentes vitesses de propagation des modes. Les fibres à saut d'indice ont une dispersion nettement supérieure aux fibres à gradient d'indice.

La **dispersion intramodale chromatique** subsiste aussi dans les fibres monomodes. Elle crée un élargissement  $\Delta\tau_c$  au bout d'une longueur d'onde. Elle dépend de la dispersion du matériau et de la dispersion de mode de guide ( $D_c = D_{\text{matériau}} + D_{\text{guide}}$ ). Dans la silice, on obtient le minimum de dispersion (zéro de dispersion) pour  $\lambda=1310\text{nm}$ .

La dispersion crée un élargissement  $\Delta\tau_c$  au bout d'une longueur  $L$  de fibre

$$\Delta\tau_c = D_c \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad \text{avec} \quad D_c = \frac{d\tau_g}{d\lambda}$$

$\Delta\lambda$  largeur spectrale de la source,  $D_c$  coefficient de dispersion chromatique qui dépend des paramètres de la fibre et de la longueur d'onde.

Sur des très longues distances, il existe une **dispersion de polarisation** (changement d'état de polarisation du mode électromagnétique lors de la propagation), son effet est plus faible que la dispersion chromatique.

### 3.4 Atténuation dans les fibres optiques

Si on injecte une puissance  $P(0)$  (en  $z=0$ ) dans une fibre optique, la puissance à une distance  $z$  sera

$$P(z) = \exp(-\alpha z)P(0)$$

$\alpha$  est le coefficient d'absorption. En exprimant la distance  $L$  en km et l'atténuation  $A$  en dB.  $\text{Km}^{-1}$ , on obtient

$$A(\text{dB.km}^{-1}) = -\frac{1}{L} 10 \log_{10} \left( \frac{P(L)}{P(0)} \right) = 10 \log_{10} (\exp(\alpha))$$

Pour les fibres optiques en Silice, les principales causes d'affaiblissement sont

L'absorption dans le matériau

Il y a deux bandes d'absorption, dans l'infra rouge à cause des vibrations moléculaires, dans l'ultra violet à cause des transitions électroniques et moléculaires.

### La diffusion de Rayleigh

Elle est causée par la nature désordonnée des molécules dans le verre. Elle diminue rapidement quand la longueur d'onde augmente suivant une loi en  $1/\lambda^4$ .

### L'absorption intrinsèque

Sous forme de pics, principalement due aux ions OH<sup>-</sup>. Cette absorption est dure à éliminer. Il faut éviter le contact avec l'eau.

Pour les fibres optiques en plastique, l'atténuation est beaucoup plus grande, c'est pourquoi ces fibres travaillent dans le visible.

## 3.6 Fenêtres de transmission

Compte tenu de l'atténuation et de la dispersion des fibres optiques, mais aussi des composants optoélectroniques disponibles, on définit plusieurs fenêtres de transmission.

Sur les fibres en plastique, on utilise la fenêtre à  $0,67\mu\text{m}$  pour les liaisons à très courte distance (moins de 100m) pour bénéficier du bon rendement des composants.

Sur les fibres en silice, on distingue traditionnellement 3 fenêtres :

**La première fenêtre de 0,8 à 0,9 $\mu\text{m}$ .** Ce n'est pas un minimum d'atténuation ni de dispersion mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques mais performant. Cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseaux locaux sur fibres multimodes, à des débits modestes. Elle est aussi utilisée pour les interconnexions haut débit (Gigabits/s) sur courtes distances.

**La deuxième fenêtre, dite parfois « bande 0 », autour de 1.3 $\mu\text{m}$ .** est un minimum relatif d'atténuation (vers 0,5dB/Km) et le minimum de dispersion chromatique. Les composants sont plus coûteux que pour la fenêtre précédente. Elle est couramment utilisée en transmission à moyenne distance (quelques kilomètres) sur fibres monomodes ainsi qu'à haut débit en réseaux local sur fibres généralement multimodes.

**La troisième fenêtre, autour de 1,55 $\mu\text{m}$ ,** correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0,2dB/Km) mais demande des composants plus coûteux. D'utilisation plus récente, elle est surtout utilisée en liaison à très longue distance sur fibres monomodes (terrestres ou sous-marines)

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des principales fenêtres de transmission pour une fibre en silice

fenêtre	première	deuxième	troisième
Longueur d'ondes	0,78 à 0,9 $\mu$ m	1,3 $\mu$ m	1,5 à 1,6 $\mu$ m
Type de fibres utilisée	Multimode	Multimode Et monomode	Monomode
Atténuation	Forte (2 à 4 dB/Km)	Faible (0,4 à 1 dB/Km)	Très faible (0,2 dB/Km)
Dispersion chromatique	Forte	Quasi nulle	Faible
Emetteurs type	DEL ; diode laser VCSEL (très hauts débits)	DEL (multimodes) Diodes lasers standard (monomodes)	Diode laser DFB (monochromatique)
Coût des composants	faible	moyen	élevé
Applications	Transmissions Courte distance ; Réseaux locaux, Gigabit à très courte distance	Transmissions moyennes et longue distance, réseaux locaux et métropolitains haut débit	Transmission très longue distance et à amplification optique
Multiplexage	Entre deux fenêtres	Entre deux fenêtres	Dense ; nombreux canaux dans la même fenêtre