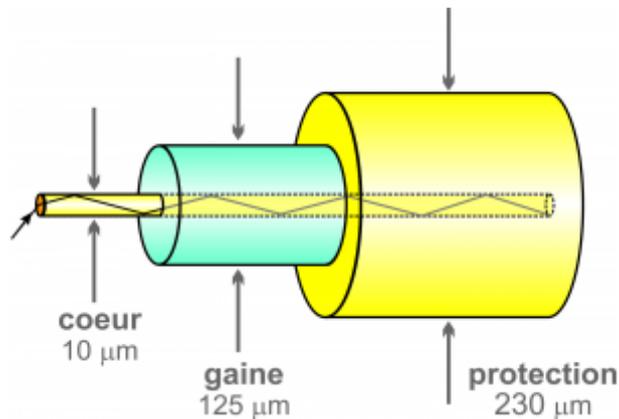


# Chapitre 1

## Fibre optique

### 1. Définition

Une fibre optique est formée d'un fil de verre très fin. Elle est constituée d'un cœur central en silice dans lequel se propage la lumière entouré par une gaine concentrique de protection dont l'indice de réfraction ( $n_g$ ). L'indice de la gaine est légèrement inférieur à celui du cœur ( $n_c$ ) (figure 1). La fibre a la propriété de conduire la lumière émise par une LED ou une diode laser. Le signal transmis subit des réflexions totales à l'intérieur de la fibre ou il sera confiné dans le cœur de la fibre.



**Figure 1 :** Structure de la fibre optique

<https://www.abavala.com/fibre-optique-pourquoi/>

La fibre est mécaniquement très fragile et prédisposée aux attaques chimiques ; c'est pour cette raison que la fibre est bien protégée, par un revêtement primaire qui est la gaine et un revêtement secondaire pour renforcer la protection de la fibre.

## 2. Notion sur la fibre optique

### 2.1. L'onde Optique

L'onde électromagnétique qui se propage dans la fibre optique est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui sont perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

### 2.2. L'indice e réfraction

Le milieu de propagation de la fibre optique est caractérisé par un indice de réfraction  $n$ . L'indice de réfraction est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le milieu de propagation.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière

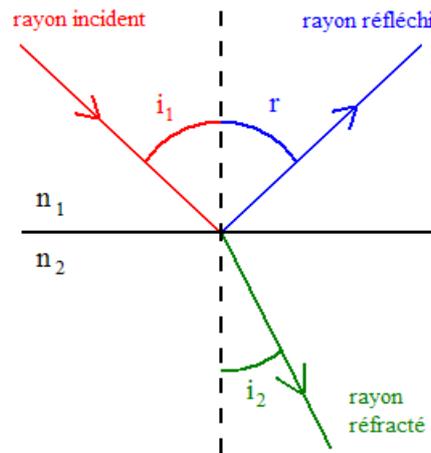
La lumière change son trajet des qu'elle rencontre un milieu réfringent.

Un milieu réfringent est un milieu qui permet la déviation de la lumière.

### 2.3. La loi de Snell Descarte

Le guidage de la lumière dans une fibre optique est basé sur la loi de Snell-Descarte. Lorsqu'un rayon lumineux se propage entre le cœur et la gaine il subit des réflexions successives tout au long de la fibre. La réflexion est un phénomène physique qui se produit lors de changement d'indice d'un milieu à un autre. Une onde électromagnétique donne naissance à deux ondes optiques dès qu'elle parvient à une surface de séparation (appelée dioptre) entre son milieu de propagation d'indice  $n_1$  et un autre milieu d'indice  $n_2$ .

Dans le milieu d'indice  $n_1$ , on appelle l'angle entre le rayon incident et la normale au dioptre « **angle d'incidence** ». L'**angle de réflexion** celui entre le rayon réfléchi et la normale au plan de séparation. Dans le milieu 2 le rayon réfracté fait un angle  $i_2$  avec la normale au dioptre appelé « **angle de réfraction** » (figure2). La vitesse de propagation de l'onde incidence est différente à celle de l'onde réfractée



**Figure 2:** Différents types de rayons

Ces trois angles sont liés par la loi de Snell-Descartes

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2 \quad (2)$$

### 3. Paramètres caractéristiques de la fibre optique

La fibre optique est souvent décrite par deux paramètres qui sont : la différence d'indice normalisée et l'ouverture numérique.

#### 3.1. Différence d'indice normalisée

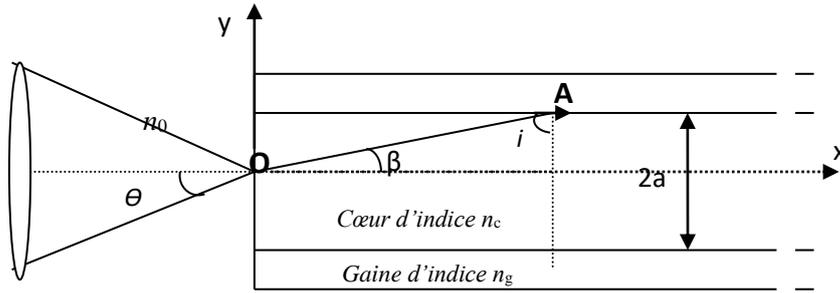
L'écart relatif  $\Delta$  entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine est représenté par la formule suivante :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (3)$$

#### 3.2. Ouverture numérique

L'ouverture numérique nommé 'ON' est défini comme la mesure d'un angle maximal qu'une fibre optique peut accepter pour donner une réflexion totale des ondes électromagnétiques qui se propagent dans la fibre. Si on injecte un rayon lumineux supérieur à cet angle il sera transmis dans la gaine et n'arrive pas au bout de la fibre.

Si on envoie à l'intérieur de la fibre optique un faisceau lumineux avec un angle  $\theta$  à l'interface air /cœur, le rayon transmis dans le cœur va faire un angle  $\beta$  avec la normale au plan de séparation des deux milieux (figure3).



**Figure3** : Présentation d'une coupe de FO

En appliquant la loi de Snell Descartes :

$$n_1 \sin(\theta) = n_c \sin(\beta) \quad (4)$$

Le signal arrivé à l'interface cœur / gaine, il subit une réflexion avec un angle  $i$

Suivant la loi de Snell Descartes :

$$n_c \sin(\beta) = n_g \sin(i) \quad (5)$$

et comme l'angle  $\beta = (\pi/2 - i)$ , et comme :  $n_1=1$  donc la formule (4) devient alors :

$$\sin(\theta) = n_c \sin(\pi/2 - i) = n_c \cos(i) \quad (6)$$

Il existe un angle critique  $i_c$  : l'angle pour lequel le rayon lumineux est réfracté parallèlement à la gaine, ce qui permet d'écrire :

$$n_c \sin(i_c) = n_g \sin(\pi/2) \quad (7)$$

$$\sin(i_c) = n_g/n_c \quad (8)$$

La formule (6) devient donc, en remplaçant  $\cos i$  par  $(1 - \sin^2 i)$  :

$$\sin(\theta_{\max}) = n_c (1 - \sin^2 i_c) = n_c (1 - (n_g/n_c)^2) \quad (9)$$

Par définition l'ouverture numérique est donnée par :

$$\text{Sin}(\theta_{\max}) = \text{ON} \text{ où : } \text{ON} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (10)$$

$$\theta_{\max} = \text{arc sin ON} \quad (11)$$

## 4. Les différents types de fibres optiques

### 4.1. Fibres optiques monomode à saut d'indice

Les fibres optiques monomodes sont des fibres qui possèdent un cœur est très fin (figure 4). Elles n'acceptent qu'un seul mode de propagation sur l'axe central (mode axial). Pour que la fibre soit monomode il faut que la condition suivante soit satisfaite :

$$v = \frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.405 \quad (12)$$

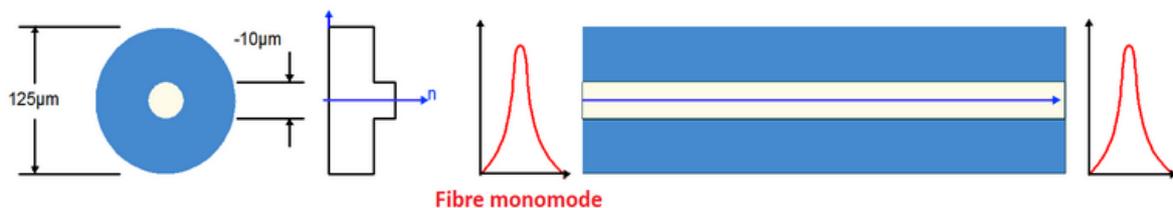
avec :

$D_c$  : diamètre du cœur de la fibre

$ON$  : ouverture numérique

$\lambda$  : longueur d'onde d'émission dans le vide

$v$  : fréquence normalisée



**Figure 4** : Structure d'une fibre optique à saut d'indice monomode

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/types.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html)

En on déduit donc, la longueur d'onde de coupure :  $\lambda_c = 2\pi a ON / 2.405$

C'est ce type de fibre qui présente les plus grandes performances, et une atténuation quasi nulle.

### 4.2. Les fibres optiques multi modes à saut d'indice (Step index)

Les fibres à saut d'indice sont des fibres dont l'indice de réfraction varie brusquement entre le cœur et la gaine, sa valeur dans le cœur est constante. Les fibres sont dites multimodes si elles permettent la propagation de plusieurs modes (figure 5). Chaque mode injecté dans la se propagent avec un angle différent.

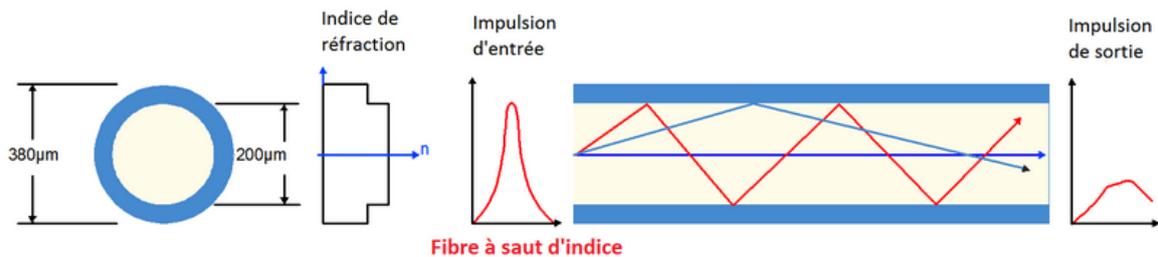
Le nombre de modes qui se propagent dans la fibre est limité et donné par :

$$N_{modes} \# 0.5 \left( \frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} \right)^2 \quad (13)$$

Où  $D_c$  : Diamètre du cœur ;

$ON$  : l'ouverture numérique ;

$\lambda$  : longueur d'onde

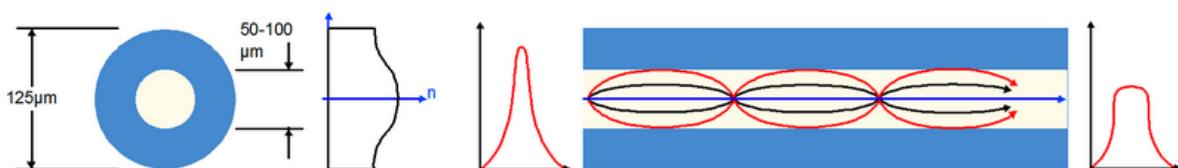


**Figure 5** : Structure d'une fibre optique à saut d'indice multimode

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/types.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html)

#### 4.3. Les fibres optiques multi modes à gradient d'indice

L'indice de réfraction du cœur diminue progressivement en allant vers la gaine. Il suit une loi parabolique depuis l'axe centrale jusqu'à l'interface cœur/gaine. Dans ce type de fibre, les rayons qui se propagent dans la fibre se déplacent en demi-ellipse (Figure 6).



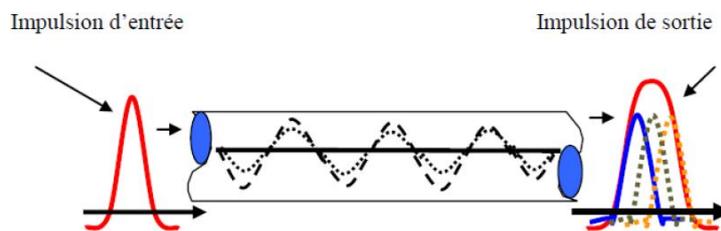
**Figure 6** : Structure d'une fibre optique à gradient d'indice

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/types.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html)

## 5. Dispersion du rayonnement

### 5.1. Dispersion modale

Dans une fibre optique multimode, les rayons lumineux arrivent au bout de la ligne en suivant des trajets différents avec des célérités différents. Ceci entraîne une dispersion du signal. Lorsqu'une impulsion lumineuse sera injectée dans la fibre, elle sera décomposée en plusieurs modes (figure 7). Certains d'entre eux arrivent avant d'autres, à la réception l'impulsion sera élargie et une distorsion du signal est obtenue par le convertisseur optique /électrique appelée « dispersion modale »



**Figure 7 :** Dispersion modale d'une fibre optique

L'expression de la dispersion modale est donnée par :

$$\frac{\Delta\tau_m}{L} \approx \frac{ON^2}{2c n_c} \quad (14)$$

### 5.2. Dispersion chromatique

La dispersion chromatique existe dans les fibres monomodes et multimodes. Elle est due à la variation de l'indice de réfraction du cœur en fonction de la longueur d'onde et de la source de lumière utilisée (figure 8). Cette variation entraîne un étalement et une déformation de l'impulsion optique lors de sa propagation dans la fibre. Elle représente un paquet d'onde qui se propage avec une vitesse de groupe  $v_g$ . L'impulsion sera élargie à la sortie de la fibre et entraîne un chevauchement des impulsions ce qui rend le codage du signal impossible



**Figure 8 :** Dispersion chromatique d'une fibre optique

L'expression de la dispersion chromatique d'une impulsion lumineuse après avoir parcourue une distance L est donné par :

$$\frac{\Delta \tau_c}{L} = \frac{dN_c}{c d\lambda} \Delta \lambda \quad (15)$$

Soit :

$$\frac{\Delta \tau_c}{L} = - \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{dn_c^2}{d\lambda^2} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (16)$$

avec

$N_c$  : indice du groupe de la propagation guidée

$n_c$  : indice de réfraction du cœur pour la longueur d'onde centrale du paquet d'ondes

$\Delta \lambda$  : la largeur spectrale de l'impulsion ( caractérise la source de lumière utilisée)

## 6. Pertes et Atténuation dans une fibre optique

La perte de puissance dans la transmission des données dans une fibre optique représente un des problèmes les plus importants. Ces pertes sont dues à plusieurs causes. Elles sont exprimées en fonction du coefficient d'absorption  $\alpha$  du matériau du cœur. Si on suppose qu'on a une puissance incidente  $P_i$ , et  $P_s$  est la puissance de sortie, l'atténuation linéique de la fibre d'une longueur L sera exprimée par :

$$P_s = P_i e^{-\alpha L} \quad (17)$$

avec :

$\alpha$  est le coefficient d'absorption [ $m^{-1}$ ] qui dépend du matériau et de la longueur d'onde

on définit l'atténuation linéique en dB/km par :

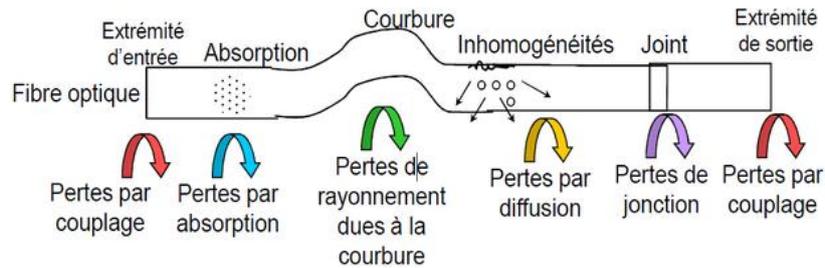
$$A = \frac{1}{L} 10 \log \left( \frac{P_i}{P_s} \right) \quad (18)$$

Ou bien :

$$A(\text{dB/km}) = 10 \log(\alpha L) = 4.34 \times 10^3 \alpha (m^{-1}) \quad (19)$$

L'atténuation de la fibre optique à plusieurs causes parmi elles :

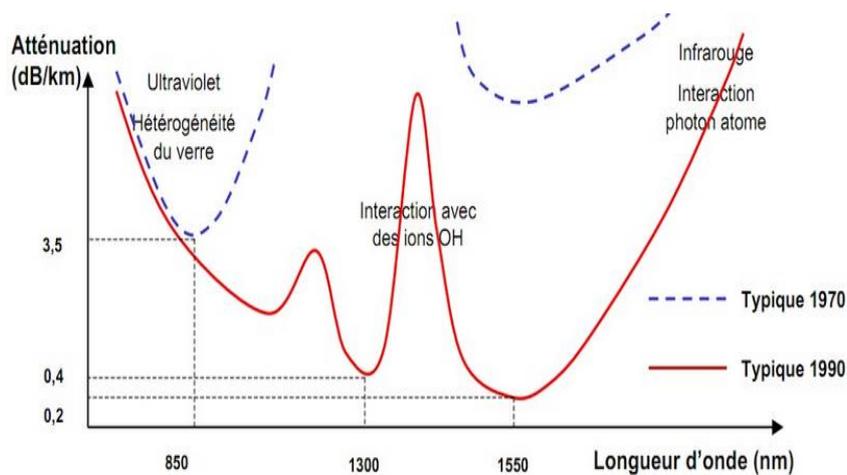
- pertes dues à la présence des impuretés
- pertes dues aux courbures de la fibre
- les pertes de couplages aux extrémités d'entrée et de sortie.
- la diffusion due aux irrégularités de l'interface cœur / gaine
- la diffusion due aux hétérogénéités de l'indice de réfraction de la silice



**Figure 9** : Facteurs contribuant à l'atténuation dans une fibre optique.

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/pertes.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/pertes.html)

La figure ci-dessous représente l'évolution de l'atténuation linéique d'une fibre optique en fonction de la longueur d'onde.



**Figure 10** : Atténuation dans une fibre optique

<https://lafibre.info/installation-fibre/laser-pour-le-ftth-visible-a-lil/12/>

## Bibliographie et webographie

- S. Rebiai, « Composants optoélectronique » *Cours et exercices*, Université de Constantine, Algérie
- Harry J. R. Dutton, “Understanding Optical Communications” IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1998.
- S.Dib « *Dispositifs optoélectroniques* » Université de Mohammed Seddik Ben Yahia-Jijel, Algérie 2016
- M. Djellouli et A. Hamouda, « L’amplification optique et son intérêt majeur dans les réseaux des télécommunications » Mémoire de recherche, Université Dr. Tahar Moulay- SAIDA, Algérie 2016

<https://www.abavala.com/fibre-optique-pourquoi/>

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/types.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html)

[http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/pertes.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/pertes.html)

<https://lafibre.info/installation-fibre/laser-pour-le-ftth-visible-a-lil/12/>

<https://optique.antoineboursin.fr/>

<http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Fibres/fibre-optique2.html>