

# La fibre optique

## Définition

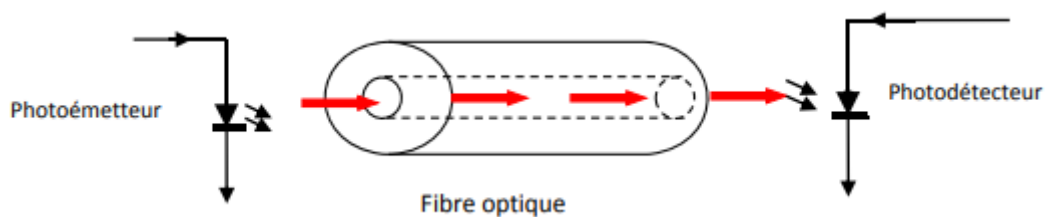
La fibre optique est un moyen de communication qui fonctionne par l'envoi de signaux optiques. La fibre a donc la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions de données terrestres et océaniques.

Les avantages de la FO par rapport aux autres lignes de transmission

- La Bande passante (100 GBits)
- Insensible (Interférences Electromagnétiques)
- Vitesse (100 \* que le Cuivre)
- Une grande capacité de transmission (Débit très élevé)
- Une très faible atténuation du signal

## Principe

**Au départ** le signal électrique est converti en un signal lumineux à l'aide d'un composant photoémetteur (Les diodes électroluminescentes et les diodes laser).



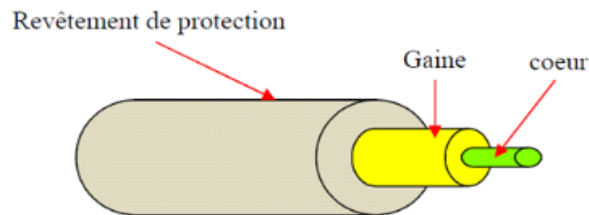
Principe de la FO

**A l'arrivée**, le signal optique est converti en un signal électrique à l'aide d'un composant photorécepteur (Les photodiodes pin et les photodiodes à avalanche).

## Constitution

La fibre optique est constituée de trois éléments :

- a) Le cœur: sert à la propagation des rayons lumineux, c'est un milieu diélectrique en (silice), d'indice de réfraction  $n_c$
- b) La gaine: entourant le cœur et constituée d'un matériau d'indice de réfraction  $n_g$ ,
- c) Le revêtement: entourant la gaine et constitué d'un matériau plastique, chargé de protéger la gaine optique des dégradations physiques,



*Structure d'une fibre optique*

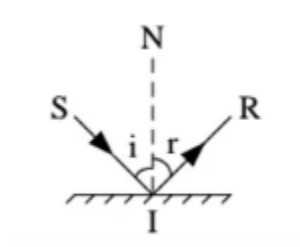
La fibre optique utilise le principe de guide d'onde. Il s'agit d'un guide optique fondé sur les propriétés réfractives de la lumière.

### **Loi de Snell Descartes**

#### *Les lois de réflexion*

On considère une surface réfléchissante plane

1. Le rayon réfléchi est dans le plan défini par la normale N et le rayon incident (le plan est appelé plan incident)
2.  $i$  (angle incident) =  $r$  (angle réfléchi)



#### **Exemple le miroir plan**

Le miroir M est généralement représenté par la trace de son plan disposé normalement au plan de figure. On couvre de hachures le côté non réfléchissant.

Le phénomène de la réflexion totale est utilisé pour canaliser la lumière, *par exemple dans les fontaines lumineuses ou dans les fibres optiques, l'endoscopie, fibroscopie.*

## 1.1 Les lois de la réfraction

La réfraction consiste en un brusque changement de direction de la lumière qui après avoir rencontré une surface réfractante, se propage dans un milieu différent de son milieu de propagation. La surface réfractante est appelée dioptre ou surface dioptrique

L'indice de réfraction  $n$  d'un milieu, est défini comme le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide  $c$  à la vitesse de la lumière dans ce milieu  $v$ . Il dépend de la longueur d'onde de la lumière.

$$n = \frac{c}{v}$$

Dans l'air comme dans le vide:  $\lambda_0 = c T$

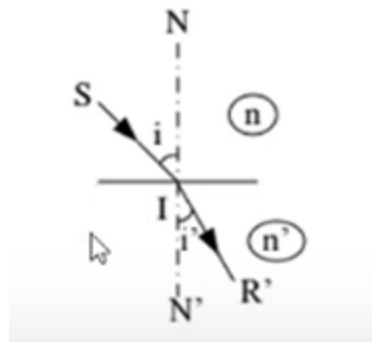
$$v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \lambda = v T \text{ alors } \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v} = n \Rightarrow n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

T: la période et  $\lambda_0, \lambda$  les longueurs d'onde dans le vide et dans le milieu respectivement.

c: La vitesse de la lumière dans le vide ( $3 \cdot 10^8$  m/s)

On appelle dioptre toute surface séparant deux milieux d'indices de réfraction différents. Un dioptre dévie donc tout rayon qui ne le frappe pas perpendiculairement, en vertu de la loi de Descartes:

$$n \sin i = n' \sin i'$$

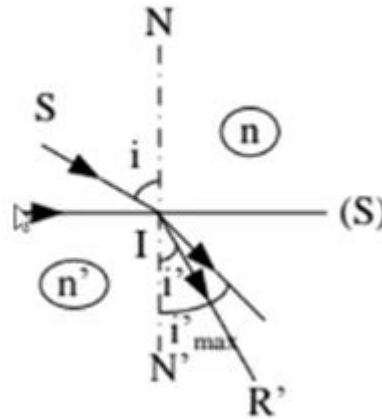
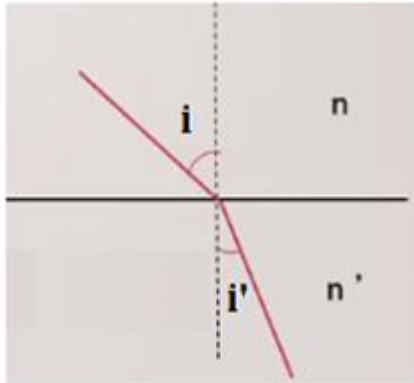


Les photons se comportent comme des soldats défilant dans un alignement parfait, qui s'embourberaient (ralentissement) en parvenant à  $O_1O_2$ . La conservation d'un alignement parfait n'aura lieu qu'au prix d'une déviation de colonne.

**Remarques** : Lorsque les angles  $i$  et  $i'$  sont petits (angle  $\leq 15^\circ$ ), la loi de Snell-Descartes pour la réfraction prend la forme simplifiée :  $n_1 \cdot i \sim n_2 \cdot i'$  connue sous le nom de « la loi de Kepler »

**1er cas:  $n < n'$**  : La lumière passe d'un milieu d'indice  $n$  à un milieu d'indice  $n'$  plus réfringent

$$\frac{n}{n'} < 1 \Rightarrow \frac{\sin i'}{\sin i} = \frac{n}{n'} < 1 \Rightarrow \sin i' < \sin i \Rightarrow i' < i$$



*Le rayon réfracté  $n < n'$  se rapproche à la normale en pénétrant dans un milieu le plus réfringent*

Le rayon réfracté se rapproche à la normale en pénétrant dans un milieu le plus réfringent

La valeur maximale de  $i$  étant  $\frac{\pi}{2}$  (incidence rasante)

La valeur maximale de  $i'$  est:  $\sin i'_{max} = \frac{n}{n'} < 1$

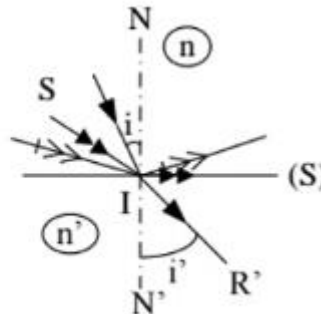
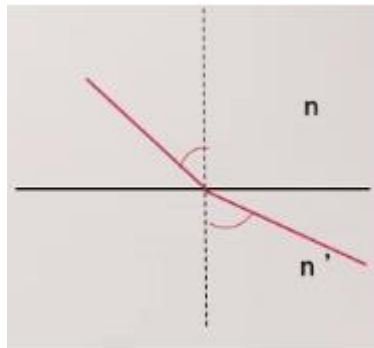
**2eme cas:  $n > n'$**  La lumière passe d'un milieu d'indice  $n$  à un milieu d'indice  $n'$  moins réfringent

$$\frac{n}{n'} > 1 \Rightarrow \frac{\sin i'}{\sin i} = \frac{n}{n'} > 1 \Rightarrow \sin i' > \sin i \Rightarrow i' > i$$

Le rayon réfracté s'écarte de la normale en pénétrant dans un milieu le moins réfringent

La valeur maximale de  $i'$  étant  $\frac{\pi}{2}$

La valeur maximale de  $i$  est :  $n \sin \beta = n' \Rightarrow \sin \beta = \frac{n'}{n} = \sin i_{max}$



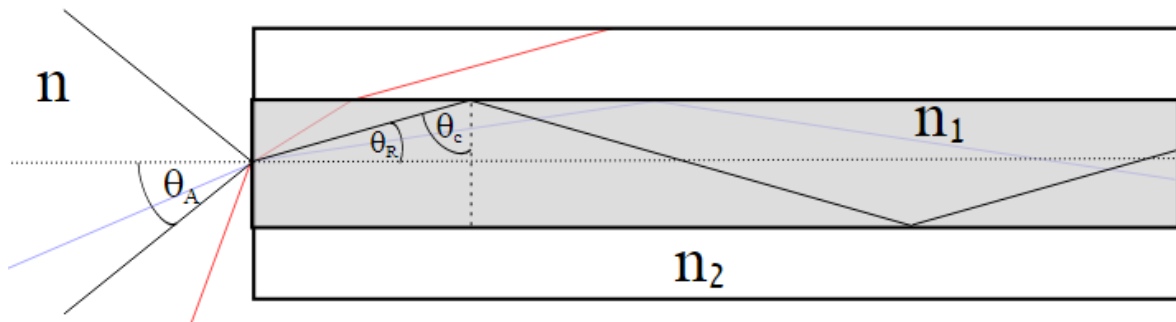
*Le rayon réfracté  $n > n'$  s'écarte de à la normale*

### Ouverture numérique

L'ouverture numérique d'une fibre optique caractérise le cône d'acceptance de la fibre : si un rayon lumineux tente de pénétrer la fibre en provenant de ce cône, alors le rayon sera guidé par réflexion totale interne ; dans le cas contraire, le rayon ne sera pas guidé.

$$\text{O. N.} = \sin(\theta) = \sqrt{n_c^2 - n_g^2}$$

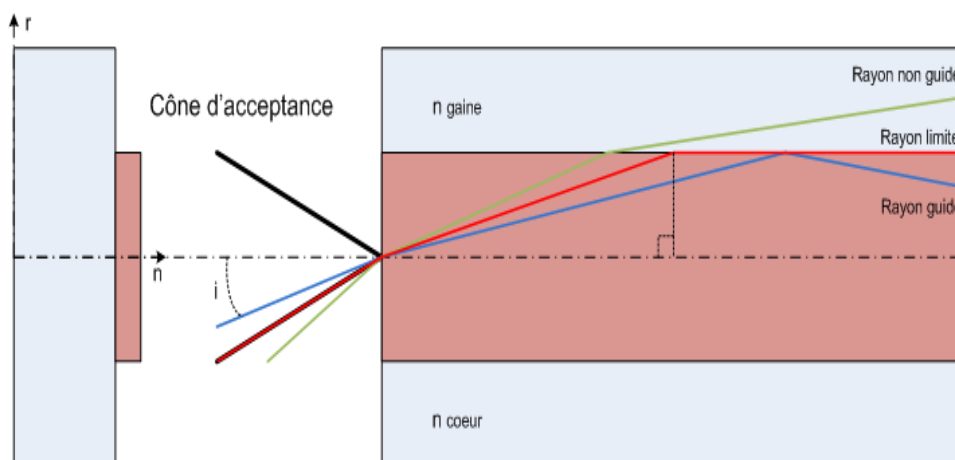
$n_c$ ,  $n_g$  et  $\theta$  respectivement les indices du cœur, de la gaine et l'angle d'incidence, alors l'ouverture numérique de la fibre s'exprime par la formule :



Remarque/ Pour que la réflexion totale se produise entre les deux milieux (cœur-gaine), il faut que l'angle  $i$  soit supérieur à un angle critique  $i_c$  ;

**L'angle limite** permettant d'accepter la lumière, appelé aussi angle d'acceptante dans la région du cœur est donné par :

$$2\theta_{max} = \arcsin \text{ON}$$



*Angle limite et cône d'acceptante pour une fibre optique*

La figure résume les différents cas possibles d'incidence :

- Un rayon qui arrive avec un angle supérieur à l'angle d'incidence (en dehors du cône), ne sera pas guidé de bout en bout à l'intérieur de la fibre optique, mais il sera dispersé dans la gaine.
  - Le rayon qui arrive avec un angle limite, sera guidé jusqu'au bout de la FO, mais avec une direction parallèle à l'axe de la FO.
  - Le rayon qui rentre avec un angle inférieur à l'angle limite, sera guidé de façon normale (en zigzag) et en suivant le principe de réflexion totale interne au sein du cœur de la FO.
- L'ouverture numérique pour les fibres télécoms est comprise entre 0.1 et 0.6.

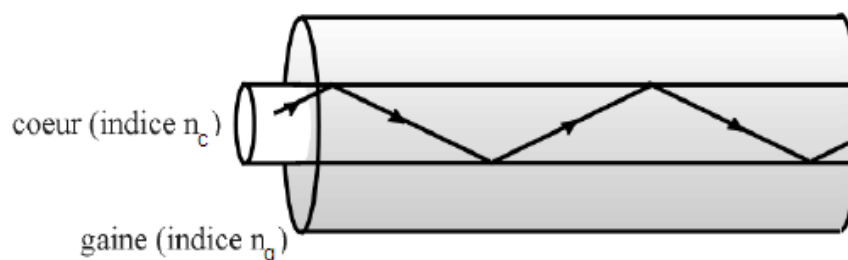
### Condition de guidage

Le guidage de la lumière dans le cœur ne pourra se faire que si :

- L'indice de réfraction  $n_c > n_g$  .
- Tous les rayons qui pénètrent dans la fibre optique sous un angle d'incidence inférieur à l'angle critique, peuvent se propager dans cette fibre par suite de multiples réflexions.

**L'angle critique** est défini comme étant l'angle pour lequel le rayon est réfracté parallèlement à la gaine, ce qui permet d'écrire :

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



## **2 Types de FO**

- FO Multimode (distance <1 km à 1 Gbits ; distance <500 m à 10 Gbits)
- FO Monomode (distance >500m à 20 km)

La longueur d'onde  $\lambda$  visible par l'œil est entre 400 nm et 780 nm

$\lambda$  850 nm et 1300 nm en multimode,

$\lambda$  1310 nm et 1550 nm en monomode

### **Fibres optiques multi modes**

Ces fibres peuvent transporter plusieurs modes, à savoir plusieurs trajets lumineux ou les propagations différentes sont possibles au cœur de la fibre.

Le diamètre du cœur des fibres multi modes est de l'ordre de **50-62.5 $\mu$ m** pour les fibres de silice et de **0.5 à 1mm** pour les fibres en plastique.

**Les fibres multi modes** permettent la propagation de plusieurs modes. Le nombre de modes qui se propagent est limité et calculé par les équations de Maxwell:

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

Où :

$D_c$  : diamètre du cœur ;

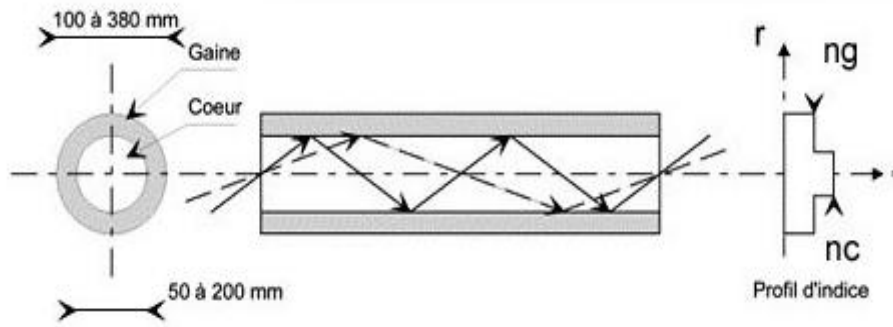
$ON$  : l'ouverture numérique ;

$\lambda$  : longueur d'onde

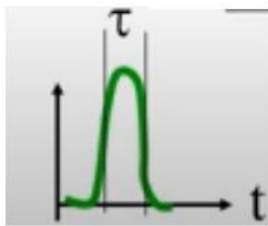
- Pour les fibres optiques multi modes on trouve deux grandes catégories: les fibres à saut d'indice et les fibres à gradient d'indice et qui suivent le profil d'indice du cœur.

### **Les fibres optiques multi modes à saut d'indice**

L'indice de réfraction varie brusquement entre le cœur et la gaine, sa valeur est constante dans le cœur de la fibre.

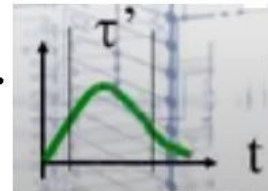


*Fibre optique à saut d'indice.*



**Pulse émis**

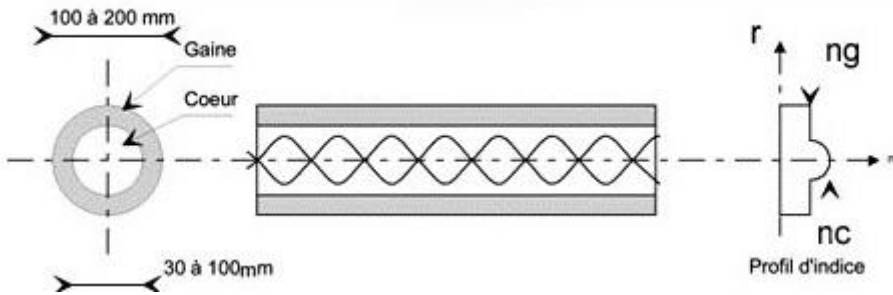
**Plusieurs modes de propagation**



**Étalement + atténuation**

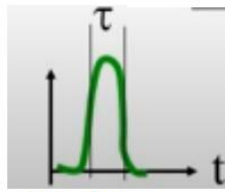
**Fibres optiques multi modes à gradient d'indice**

L'indice du cœur diminue suivant une loi d'allure parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-guide.

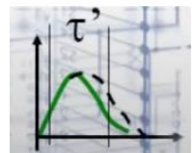


*Structure d'une fibre optique à gradient d'indice*





Plusieurs modes de propagation

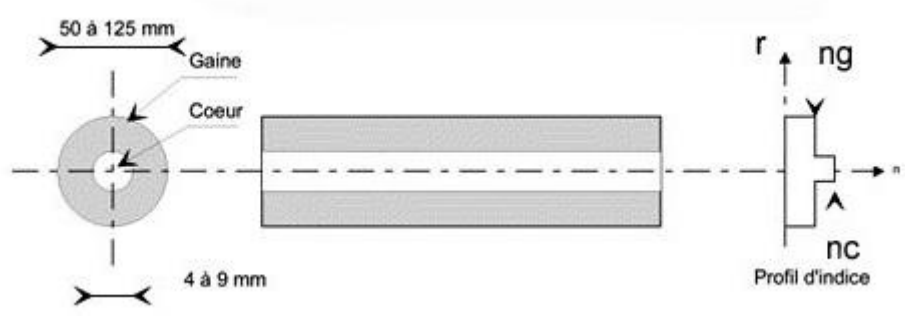


Atténuation + étalement moins important

**Fibres optiques monomodes**

Ce sont des fibres dont le cœur possède un diamètre très étroit. Un seul mode peut se propager sur l'axe central, le diamètre du cœur de la fibre monomode varie de **7 à 10μm**,

Dans ces conditions, l'approximation de l'optique géométrique n'est plus valable et les calculs doivent recourir à l'électromagnétisme.



*Structure d'une fibre optique monomode*

**Condition de propagation monomode**

Pour que la fibre soit monomode, il faut satisfaire la condition donnée par cette expression:

$$\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.405$$

Avec :

*D<sub>c</sub>*: diamètre du cœur de la FO

*ON*: ouverture numérique,

*λ*: longueur d'onde d'émission

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

Par conséquent, la fibre optique n'est monomode qu'au-delà de la longueur d'onde correspondante  $\lambda_c$ .

- Le terme monomode signifie bien que pour chaque longueur d'onde  $\lambda > \lambda_c$ , un seul mode se propage. Cela ne veut pas dire que la fibre optique ne guide qu'une seule longueur d'onde ! Au contraire, les fibres monomodes se prêtent très bien au multiplexage en longueur d'onde.