

Chapitre 2 : Etude de la propagation dans les fibres optiques

Introduction

Pour étudier la propagation dans une fibre optique, deux approches principales sont généralement admises : l'approche ondulatoire et l'approche géométrique. La première repose sur la théorie électromagnétique, indispensable pour décrire les phénomènes de propagation de la lumière dans ce type de milieu. La deuxième qui considère la lumière comme un rayon rectiligne pour décrire la propagation.

La propagation de la lumière à travers un matériau est décrite par la résolution des équations de Maxwell, qui régissent l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Ces équations sont complétées par les relations constitutives du matériau étudié, permettant ainsi de prendre en compte ses propriétés spécifiques (permittivité, perméabilité, etc.).

On appelle "mode" d'un guide d'ondes, la solution des équations de Maxwell correspondant à une onde qui se propage dans le guide sans aucune excitation externe.

2.1 La fibre optique

2.2.1 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. Elle offre un débit d'information nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux, et supporte un réseau large bande par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone et les données informatiques.

2.2.2 Constitution

La fibre optique est constituée de trois éléments :

- a) Le cœur (core): sert à la propagation des rayons lumineux, c'est un milieu diélectrique en (silice), d'indice de réfraction n_c
- b) La gaine (cladding): entourant le cœur et constituée d'un matériau d'indice de réfraction n_g , légèrement inférieur à n_c .
- c) Le revêtement (coating) : entourant la gaine et constitué d'un matériau plastique, chargé de protéger la gaine optique des dégradations physiques, figure (2.1).

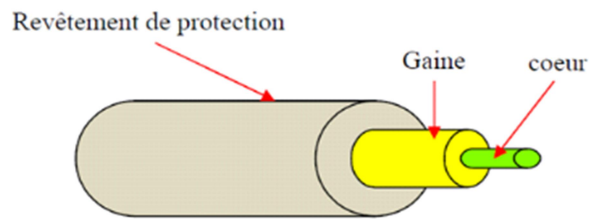
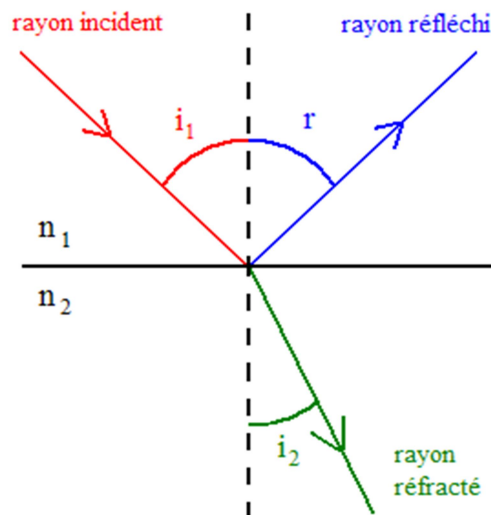


Figure (2.1) : Structure d'une fibre optique

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

Elle exprime le changement de direction d'un faisceau lumineux lors de la traversée d'une paroi séparant deux milieux où chaque milieu est caractérisé par sa capacité à ralentir la lumière.



Le passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 ($n_1 < n_2$), par un rayon lumineux ayant un angle d'incidence i_1 est donné par :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

Avec:

i_1 : angle d'incidence, angle que fait le rayon avec la normale du plan.

i_2 : angle de réfraction,

n : indice de réfraction d'un milieu transparent.

2.2 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.

a) Différence d'indice normalisée

Elle définit la différence entre l'indice de réfraction du cœur et celui de la gaine. Appelé aussi l'écart relatif, son expression est donnée par :

$$\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$$

b) Ouverture numérique

L'ouverture numérique est un paramètre important pour coupler une grande quantité de lumière. Elle est symbolisée par 'ON'. (NA : **Numerical Aperture**)

En optique géométrique, on introduit la notion du cône d'acceptance, ou encore l'ouverture numérique.

La formule de l'ouverture numérique va donc permettre de définir l'angle d'incidence limite permettant le guidage du signal lumineux.

- **Expression de l'ouverture numérique**

Soit une fibre optique de rayon a , θ étant l'angle que fait le rayon lumineux avec l'interface air/fibre.

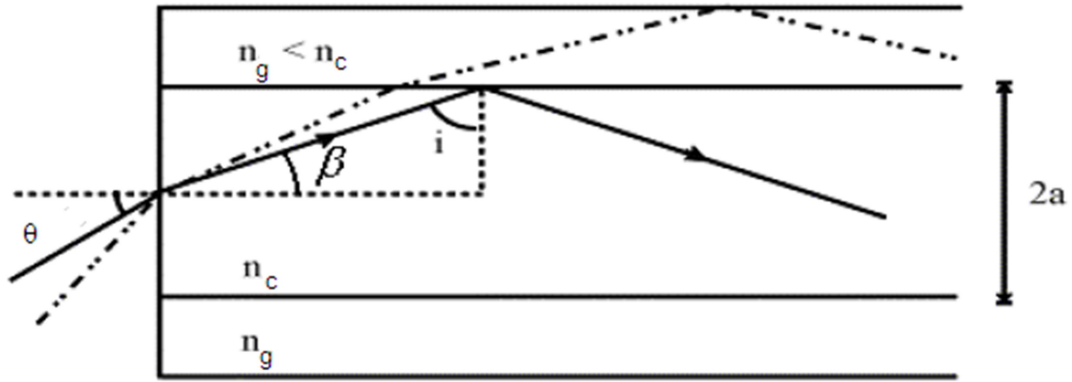


Figure (2.2) : Présentation d'une coupe de Fibre optique

- En appliquant la loi de Snell Descartes, sur la figure (1.2) qui représente une coupe de la fibre optique, on aura alors :

$$n_1 \sin \theta = n_c \sin \beta \quad (2.1)$$

L'angle $\beta = (\pi/2 - i)$, et comme : $n_1 = 1$ (indice de réfraction de l'air), donc la formule (1.1) devient alors :

$$\sin \theta = n_c \cos i \quad (2.2)$$

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

$$n_c \sin (i_c) = n_g \sin (\pi/2) \quad (2.3)$$

En remplaçant $\cos i$ par $\sqrt{1 - \sin^2 i}$ et $\sin i$ par son expression de (2.3) ; la formule (2.2) devient alors :

$$\sin(\theta_{max}) = n_c \sqrt{1 - (n_c/n_g)^2} \quad (2.4)$$

Par définition l'ouverture numérique est donnée par :

$\sin(\theta_{max}) = ON$, Avec :

$$ON = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (2.5)$$

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

$$2\theta_{max} = \arcsin ON \quad (2.6)$$

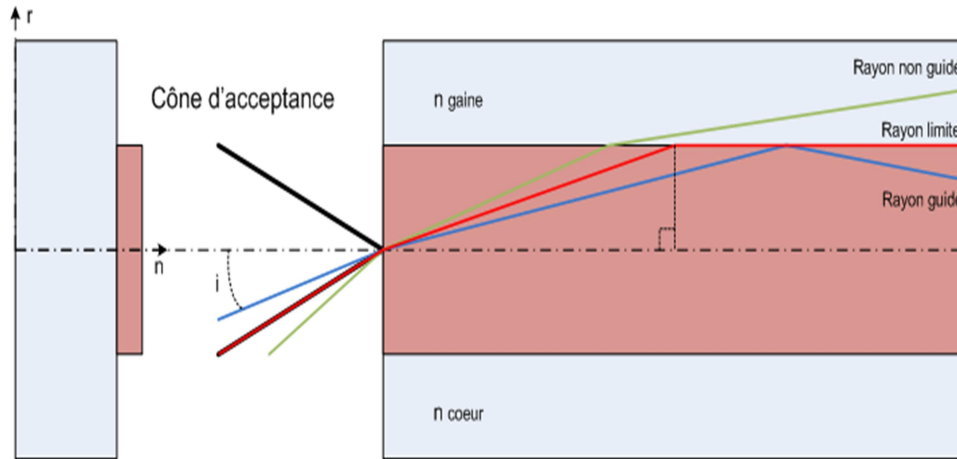


Figure (2.3) : Angle limite et cône d'acceptance pour une fibre optique

La figure (2.3) 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.

2.3 Condition de guidage

Le guidage de la lumière dans le cœur ne pourra se faire que si : voir figure (2.4)

- L'indice de réfraction du guide doit être légèrement supérieur à celui de la gaine.

- 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.

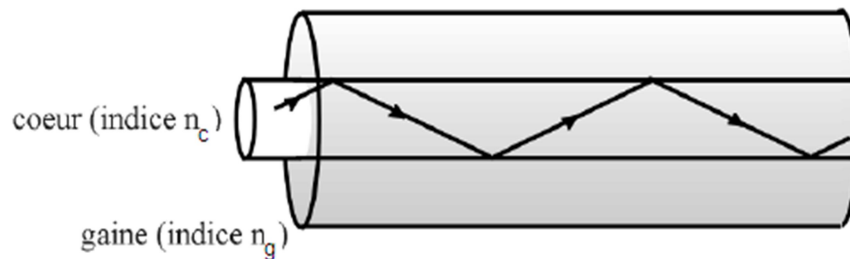


Figure (2.4) : Réflexion totale interne dans le cœur de la fibre optique

2.4 Propagation de l'onde dans les fibres optiques

Dans la Fibre optique, l'onde est guidée par des réflexions totales internes et on peut la représenter par des modes de propagation qui sont les fibres multi modes et les fibres monomodes.

2.4.1 Fibres optiques multi modes (MMF : Multi Mode Fiber)

Ce sont les premières à avoir été découvertes et mises en place. Comme leur nom l'indique, ces fibres peuvent transporter plusieurs modes, à savoir plusieurs trajets lumineux où les propagations différentes sont possibles au cœur de la fibre.

Le diamètre du cœur des fibres multi modes est de l'ordre de **50-62.5μm** 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:

$$N_{modes} \approx 0.5 \left(\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} \right)^2 \quad (2.7)$$

Où :

D_c : diamètre du cœur ;

ON : l'ouverture numérique ;

λ : 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.

a) Les fibres optiques multi modes à saut d'indice (Step index)

L'indice de réfraction varie brusquement entre le cœur et la gaine, sa valeur est constante dans le cœur de la fibre, figure (2.5)

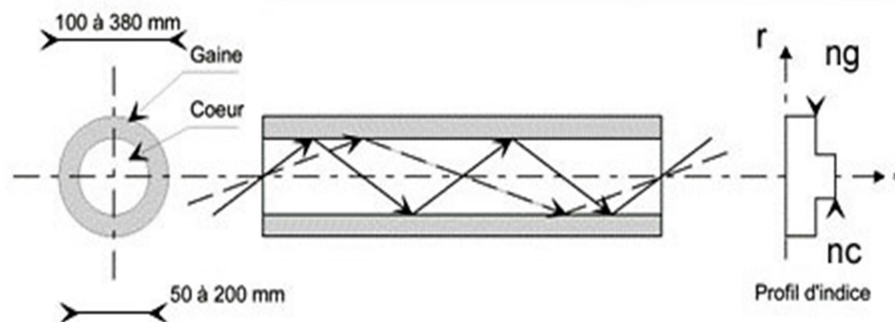


Figure (2.5) : Fibre optique à saut d'indice.

b) Fibres optiques multi modes à gradient d'indice (Graded index)

L'indice du cœur diminue suivant une loi d'allure parabolique depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine. Figure (2.6).

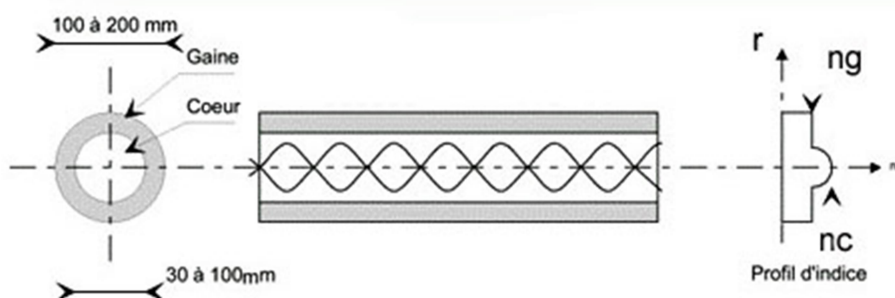


Figure (2.6): Structure d'une fibre optique à gradient d'indice

2.4.2 Fibres optiques monomodes SMF (Single Mode Fiber)

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 10 μm**, figure (2.7).

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

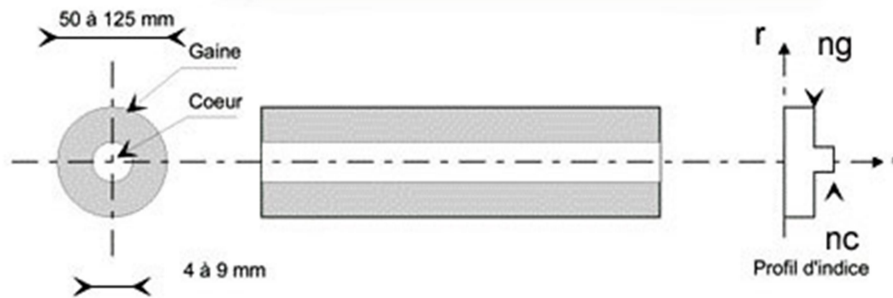


Figure (2.7) : Structure d'une fibre optique monomode

- **Condition de propagation monomode**

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

$$\frac{\pi \cdot D_c \cdot ON}{\lambda} < 2.405 \quad (2.8)$$

Avec :

D_c : diamètre du cœur de la FO

ON : ouverture numérique,

λ : longueur d'onde d'émission

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

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

2.5 Les limitations de la fibre optique

Les principales caractéristiques de transmission portent sur l'affaiblissement du signal lumineux et la dispersion des impulsions lumineuses. Ces deux phénomènes constituent les limitations de la fibre optique

2.5.1 Atténuation dans les fibres optiques

L'atténuation dans les télécommunications correspond à une diminution de la puissance du signal transmis où l'intensité lumineuse décroît au cours de la propagation de l'onde dans la fibre.

Les facteurs contribuant à l'atténuation dans une fibre optique sont principalement l'absorption, la diffusion due aux hétérogénéités de l'indice de réfraction du cœur, la diffusion due aux irrégularités de l'interface cœur gaine, ainsi que les pertes dues aux courbures et aux couplages et raccordements.

La principale cause de pertes par absorption est due à la présence d'impuretés, intervenant dans la technologie de fabrication (essentiellement des ions Cu^{++} et Fe^{++} , des radicaux (OH°) et des dopants GeO_2 , $\text{P}_2\text{O}_5\dots$).

- Toutes les pertes sont exprimées en fonction du coefficient d'absorption α du matériau du cœur.

On mesure l'atténuation de la lumière dans la fibre optique à l'aide de la formule suivante:

$$P_s = P_i e^{-\alpha L} \quad (2.9)$$

Avec :

L : Longueur de la fibre, [km]

P_i : la puissance incidente (puissance qui a été couplée à l'entrée), [mWatt]

P_s : puissance en sortie de la fibre [mWatt]

α : coefficient d'absorption [m^{-1}]

- L'atténuation est chiffrée en (dB) telle que : $10 \log P_s / P_i = (\text{dB})$

Et on trouve donc :

$$\text{Att} = -4.34 \alpha L \quad (2.10)$$

2.5.2 Dispersion dans les fibres optiques

La dispersion est un phénomène qui se manifeste comme un étalement temporel des impulsions transmises dans une fibre, elle s'exprime en unité de temps sur unité de longueur (ns/km), on distingue :

a) La dispersion modale

La dispersion modale, dite parfois intermodale. Quand on utilise une fibre multi mode, la lumière peut prendre plusieurs chemins (modes). La distance parcourue par certains modes est donc différente de la distance parcourue par d'autres modes.

Lorsqu'une impulsion est envoyée dans la fibre optique, elle se décompose selon les différents modes, certaines composantes arrivent avant d'autres ce qui provoque un étalement de l'impulsion.

Les différents temps de propagation entraînent un étalement des impulsions émises dans la fibre optique. Cette dispersion intermodale crée un élargissement d'impulsion noté $\Delta\tau_{im}$.

- Pour une fibre à saut d'indice, seule la longueur du trajet de chaque mode varie car la vitesse reste identique.
- Les fibres optiques multi modes à gradient d'indice ont précisément été développées pour répondre aux problèmes de la dispersion modale. En effet, l'indice de réfraction n'est pas constant, la longueur du trajet et la vitesse de propagation de chaque mode va varier: les modes d'ordre élevé empruntent des trajets plus longs où l'indice de réfraction est plus faible, mais avec une vitesse plus importante que les modes d'ordre moins élevés qui se propagent au voisinage de l'axe optique, donc sur des trajets plus courts mais avec des vitesses plus lentes.

➤ La dispersion modale est donnée par l'expression :

$$\Delta\tau_{im} = \frac{L.(ON)^2}{2.C.n_c} \quad (2.11)$$

Avec :

ON : ouverture numérique ; n_c : indice de réfraction du cœur

C : vitesse de la lumière dans le vide [m/s] ; L : longueur de la fibre [km]

b) Dispersion chromatique

La dispersion chromatique regroupe deux genres : dispersion du matériau et la dispersion du guide.

Dispersion du matériau

Comme une impulsion lumineuse issue de source optique est composée de plusieurs longueurs d'ondes, l'indice de réfraction étant différent, selon la longueur d'onde de la lumière. Chaque longueur d'onde se propage dans la fibre optique avec une vitesse spécifique, certaines longueurs d'ondes arrivent avant d'autres et l'impulsion s'étale (s'élargit).

Dispersion du guide

Cette dispersion est due au fait que la lumière n'est pas strictement confinée dans le cœur. Les champs électriques $\vec{E}$ et magnétique $\vec{H}$ constituant l'impulsion lumineuse s'étendent à l'extérieur du cœur. Ainsi $\vec{E}$ et $\vec{H}$ débordent dans la gaine d'autant plus que la longueur d'onde est grande, l'indice de réfraction vu par l'onde est donc une moyenne entre n_c et n_g .

Les longueurs d'ondes les plus petites auront tendance à se propager plus lentement que les longueurs d'ondes plus grandes, d'où un élargissement de l'impulsion lumineuse.

➤ La dispersion chromatique est donnée par :

$$\Delta\tau_{ch} = D_{ch} \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (2.12)$$

Avec :

D_{ch} : coefficient de dispersion chromatique [$\text{Ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]

$\Delta\lambda$: largeur spectrale de la source [nm] ; L : longueur de la fibre optique [km]

2.6 Fenêtres de transmission

Compte tenu de l'atténuation et la dispersion des fibres optiques, mais aussi des caractéristiques des composants optoélectroniques disponibles, on définit des fenêtres de transmission « bandes de longueurs d'ondes » de propriétés spécifiques.

Sur les fibres en Silice, on distingue traditionnellement trois fenêtres selon l'ordre des longueurs d'ondes.

En supposant ces profils d'atténuation, on remarque trois fenêtres spectrales où l'atténuation est assez faible, Figure (2.8).

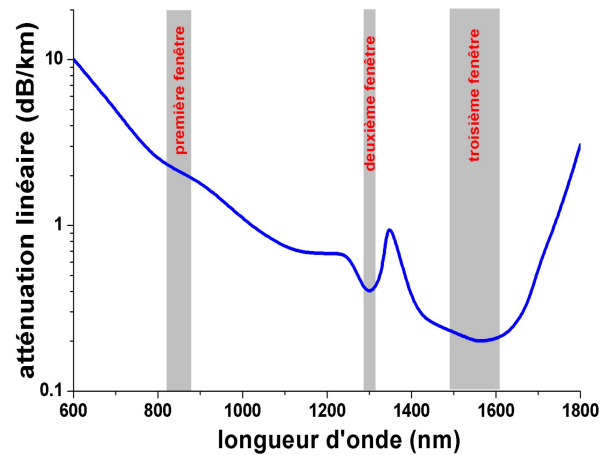


Figure (2.8): Fenêtres de transmission pour la fibre en Silice

La 1^{ère} Fenêtre : de **0.8 à 0.9μm**, n'est pas un minimum d'atténuation, ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques (Silicium pour les détecteurs, GaAs pour les émetteurs) ; cette fenêtre permet des liaisons peu coûteuse à courtes distances ou en réseaux locaux, sur des fibres multi modes à des débits de Gbits.

La 2^{ème} Fenêtre : autour de **1.3μm**, est un minimum relatif d'atténuation (vers 0.5dB/km) et le minimum de dispersion chromatique; les composants sont plus coûteux qu'à 0.85μm, mais elle est couramment utilisée en transmission à moyenne distance (qq10 de km) sur fibres monomodes, ainsi qu'à haut débit en réseau local.

La 3^{ème} Fenêtre : autour de **1.55μm**, correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0.2dB/km), mais elle demande des composant plus coûteux, à cause du problème de dispersion chromatique, elle est d'utilisation plus récente, elle est surtout utilisée en liaisons à très longues distance sur des fibres monomodes (terrestres ou sous marines), avec des portées dépassant les 100km et des débits de plusieurs Gbits/s.