

Chapitre 2

Fibre optique

2.1 Les fibres optiques

L'indice de réfraction du cœur de la fibre est supérieur à celui de la gaine ce qui empêche le rayon lumineux de sortir du cœur de la fibre, le rayon étant alors guidé par réflexions totales sur l'interface cœur-gaine.

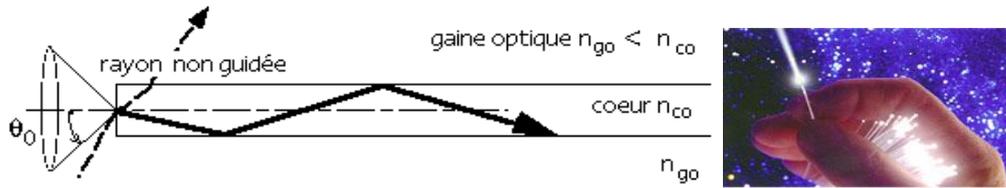


Figure 2.1 : La fibre optique [4]

Les fibres optiques sont classifiées en trois types:

- Fibre optique multimode à gradient d'indice
- Fibre optique multimode à saut d'indice
- Fibre optique monomode

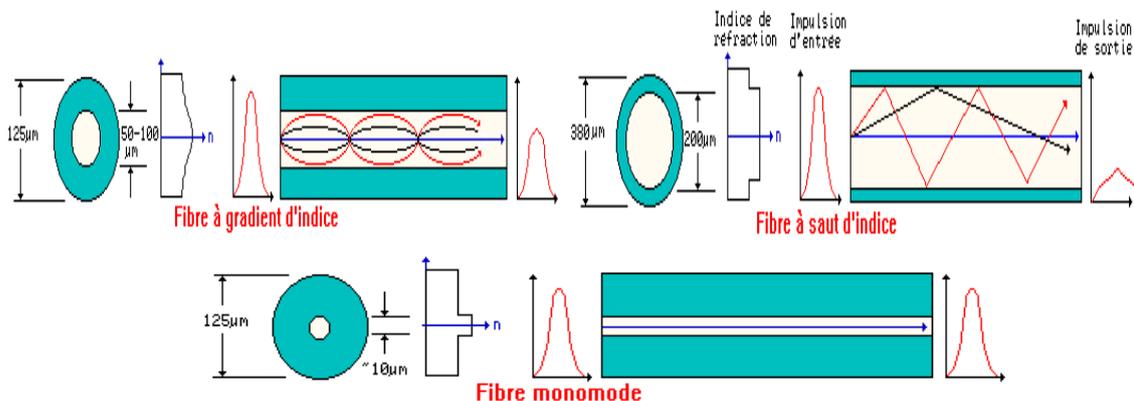


Figure 2.2 : Différents types de fibre optique [5]

2.2 Fibres optiques multimodes

Une fibre optique multimode est un guide d'ondes diélectrique circulaire dont le cœur a un diamètre grand devant la longueur d'onde utilisée.

- $2a = 50$ à $200 \mu\text{m}$ pour $\lambda = 0.8$ à $1.6 \mu\text{m}$ (fibre de silice)
- $2a = 0.5$ à 2mm pour $\lambda = 0.4$ à $0.7 \mu\text{m}$ (fibre de plastique)

III.2.1 Fibre optique à saut d'indice :

C'est le type le plus simple, dans cette fibre, le cœur de diamètre $2a$, est homogène et d'indice n_1 . Il est entouré d'une gaine optique de diamètre extérieur $2b$ et d'indice n_2 inférieur à n_1 .

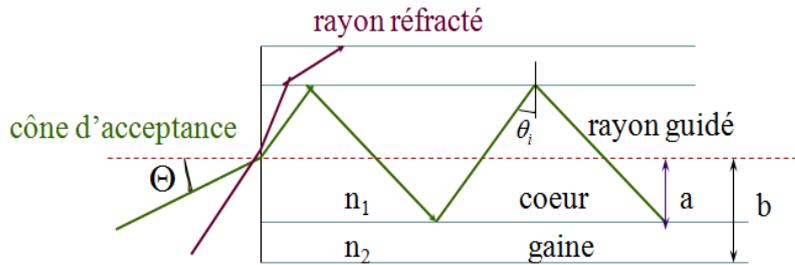


Figure 2.3 : Fibre optique à saut d'indice

D'après la loi de réfraction de Descartes, on peut déterminer l'angle critique d'incidence pour assurer le guidage de rayons.

2.2.1-a Ouverture numérique

A l'interface cœur-gaine:

$$\theta_{ic} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad 2.1$$

θ_{ic} L'angle critique d'incidence)

Cet angle correspond à l'angle critique d'incidence au niveau de l'interface air-cœur que l'on peut déterminer par la loi de Descarte :

$$\sin \Theta = n_1 \cos \theta_{ic} \quad 2.2$$

d'où

$$\cos \theta_{ic} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{ic}} = \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \quad 2.3$$

$$\sin \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 2.4$$

Donc Θ appelé l'ouverture numérique de la fibre.

L'ouverture numérique est un paramètre essentiel pour caractériser la fibre optique, une forte ouverture numérique permet de coupler beaucoup de lumière dans la fibre optique, ce qui est un avantage pour les applications optiques mais aussi pour les transmissions à courte distance, par contre elle crée une forte dispersion de temps de propagation entre les rayons, ce qui est un inconvénient en télécommunications. Il existe de nombreux types de fibre à saut d'indice, qui diffèrent par leur matériaux, leur diamètres cœur/gaine, et leur ouverture numériques, qui vont de 0.3 à 0.6 par exemple fibre (toute silice 100/140 μ m, d'ON=0.28).

2.2.1-b La trajectoire de la lumière dans une fibre à saut d'indice

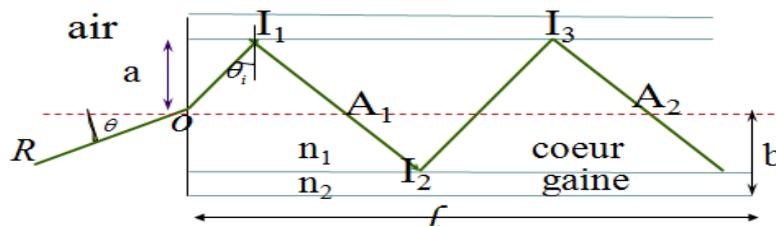


Figure 2.4: trajectoire de la lumière dans une fibre à saut d'indice

Soit un rayon R incident avec l'angle θ au point O au bout de la fibre d'indice n_1 et celui de la gaine n_2 , le chemin optique Effectué par le rayon R à l'intérieur d'une fibre de la longueur l est:

D'où N désigne le nombre de trajets égaux à L_1 soit:

Avec :

$$L = N.L_1 \quad 2.5$$

Donc

$$OI_1 = \frac{a}{\cos \theta_i} \quad 2.6$$

$$OI_1 = \frac{a.n_1}{n_0.\sin \theta} \quad 2.7$$

$$L_1 = n_1[OI_1A_1] = 2n_1.OI_1 \quad 2.8$$

$$L = \frac{2.n_1^2.a}{n_0.\sin \theta} \cdot \frac{l.n_0.\sin \theta}{2.a.\sqrt{n_1^2 - n_0^2.\sin^2 \theta}} = \frac{2.n_1^2.a}{2.a.\sqrt{n_1^2 - n_0^2.\sin^2 \theta}} = \frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2.\sin^2 \theta}} \quad 2.9$$

2.2.2 Fibres optiques à gradient d'indice

Ces fibres optiques sont spécialement utilisées dans les télécommunications, le cœur n'est plus homogène (le cas d'une fibre à saut d'indice), la valeur de l'indice décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface cœur-gaine, suivant l'expression suivante :

$$n(x) = n_1 \left(1 - \Delta \left(\frac{x}{a} \right)^\alpha \right) \quad 2.10$$

avec α : exposant de profil d'indice

Δ : est une constante en fonction de n_1 et n_2 .

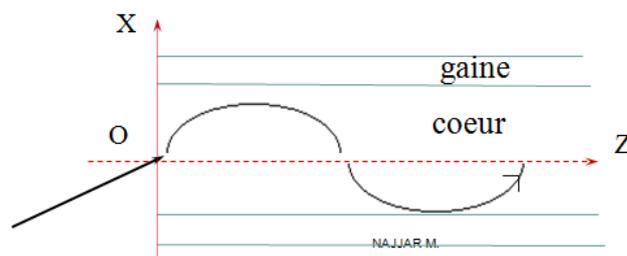


Figure 2.5: Trajectoire de la lumière dans une fibre à gradient d'indice

2.2.2.a Fibre optique quadratique

Dans le cas d'une fibre optique quadratique l'indice du cœur en tout point M varie continûment de façon quadratique avec la distance sur l'axe X , c'est-à-dire $\alpha=2$, donc l'expression de l'indice du cœur est la suivante :

$$n(x) = n_1(1 - Ax^2) \quad 2.11$$

2.2.2.b La trajectoire de lumière dans la fibre

Soit un rayon lumineux R se propageant rectilignement dans l'air pénètre dans le cœur de la fibre en point O sous faible incidence.

A l'interface cœur-gaine il faut avoir une continuité d'indice

$$x(z) = \frac{a \cdot \sin \theta}{\sqrt{2 \cdot n_1 (n_1 - n_2)}} \sin \left(\sqrt{2 \left(1 - \frac{n_2}{n_1} \right)} \cdot \frac{z}{a} \right) \quad 2.12$$

L'ouverture numérique est représentée par l'expression suivante :

$$\sin \Theta = \sqrt{n(x)^2 - n_2^2} \quad 2.13$$

Cette ouverture diminue de Θ à 0 au fur et à mesure que le point d'incidence s'éloigne de l'axe. Donc on injecte en général moins de puissance dans une fibre à gradient d'indice que dans une fibre à saut d'indice.

L'avantage de ce type de fibre est de minimiser la dispersion de temps de propagation entre les rayons.

La fibre optique à gradient d'indice la plus utilisée en télécommunications à moyenne distance, a pour ouverture numérique 0.2 et pour diamètres cœur/gaine 50/125 μm et 62.5/125 μm utilisées en informatique et 85/128 utilisées en vidéocommunications.

2.2.3 Dispersion des fibres multimodes

Dans la fibre optique multimodes, on peut distinguer deux types de dispersion :

- Dispersion intermodale
- Dispersion chromatique

2.2.3-a Dispersion intermodale

C'est en générale la cause principale de dispersion dans les fibres optiques multimodes. Elle est due au fait que tous les rayons (les modes) n'ont pas le même trajet ni la même vitesse de propagation.

Une impulsion lumineuse injectée dans la fibre va donc s'élargir.



Figure 2.6: L'effet de la dispersion et de l'atténuation dans la fibre optique

Fibre à saut d'indice

Dans le cas d'une fibre à saut d'indice le cœur est homogène c'est-à-dire La dispersion intermodale vaut, par unité de longueur :

$$\Delta \tau_{in} = \frac{\tau(\Theta) - \tau(0)}{\mathcal{L}} \quad 2.14$$

$$\Delta \tau_{in} = \frac{n_1}{c} \left[\frac{n_1}{n_2} - 1 \right] \quad 2.15$$

fibre à gradient d'indice

Dans le cas d'une fibre à gradient d'indice, l'indice de réfraction est représenté par l'expression suivante:

$$\Delta\tau_{in} = \frac{\tau(\theta_a) - \tau(0)}{\mathcal{L}} \quad 2.16$$

$$n(r) = n_1 \left(1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^N \right) \quad 2.17$$

$$\Delta\tau_{in}(opt) = \frac{n_1 \Delta^2}{8c} \quad 2.18$$

2.2.3-b La dispersion chromatique

La dispersion chromatique est proportionnelle à la longueur parcourue. Sa valeur par unité de longueur vaut :

Avec $\Delta\lambda$: largeur spectrale de la source

D_M : Dispersion due au matériau

D_G : Dispersion due au guide

étant en ps/km et $\Delta\lambda$ en nm, ces deux termes (D_M et D_G) s'expriment en ps/nm/km
 $\Delta\tau_c$

Donc la dispersion totale :

$$\Delta\tau = \sqrt{\Delta\tau_{in}^2 + \Delta\tau_c^2} \quad 2.19$$

2.3 Fibres optiques monomodes

Les fibres optiques monomodes ne subissent pas la dispersion intermodale. Elles ont une importance considérable dans les transmissions à longue distance. On les trouve également dans les systèmes où la cohérence de la lumière doit être conservée.

La fibre optique monomode est un guide d'onde diélectrique dont le cœur a un diamètre faible devant la longueur d'onde utilisée.

La fibre optique classique est à saut d'indice, avec la condition sur la fréquence réduite V :

$$V = a.k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405 \quad 2.20$$

La longueur d'onde de coupure pour une fibre monomode est définie par :

$$\lambda_c = \frac{2.\pi.a}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 2.21$$

Pour que V (la fréquence réduite) reste toujours inférieur à 2,405, il faut que :

$$\lambda > \lambda_c \quad 2.22$$

pour une longueur d'onde donnée, la fibre est monomode si le produit $a\sqrt{\Delta}$ est inférieur à une constante, elle-même proportionnelle à λ .

2.4 Atténuation et pertes des fibres optiques

Dans les fibres optiques on peut distinguer trois types d'atténuation et de pertes :

- Atténuation intrinsèque
- Pertes par courbure et microcourbures
- Pertes aux raccordements

Dans les conditions théoriques (en particulier en l'absence de courbures et de microcourbures), la puissance optique reste guidée dans le cœur, mais subit une

atténuation en $10^{-\alpha \frac{z}{10}}$ due à deux phénomènes physiques dans le matériau :

- La diffusion
- L'absorption.

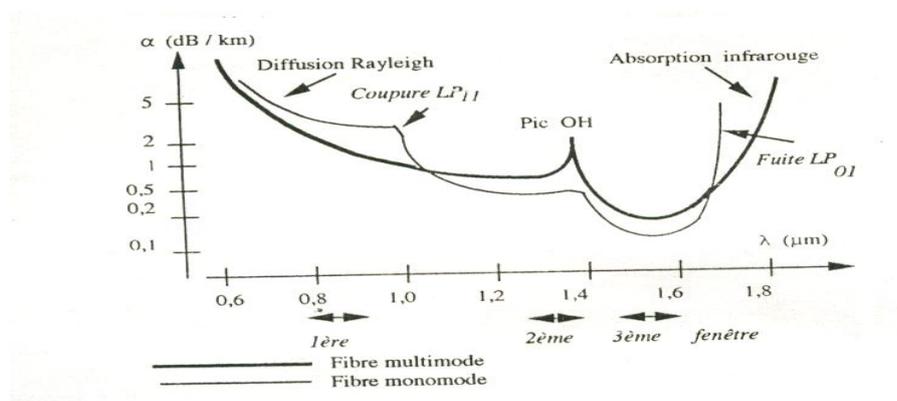


Figure 2.7: Courbe d'atténuation en fonction de longueur d'onde [6]

D'après la courbe d'atténuation on peut distinguer trois fenêtres de transmission :

- La 1^{ère} fenêtre (0,8- 0,9 μ m) ne correspond pas à un minimum d'atténuation (2 à 3 dB/km) ni de dispersion mais à l'optimum d'utilisation des matériaux les mieux maîtrisés (silicium et GaAs).
- La 2^{ème} fenêtre (vers 1,3 μ m) correspond à un minimum relatif d'atténuation (0,4 à 0,5 dB/km) et au minimum de dispersion chromatique.
- La 3^{ème} fenêtre (vers 1,55 μ m) est le minimum absolu d'atténuation (0,15 à 0,2 dB/km) mais demande des composants plus coûteux et l'annulation de la dispersion chromatique y est plus délicate.

2.4.2 Pertes aux raccordements

Cause de pertes

Lorsqu'on raccorde bout à bout, par épissure ou à l'aide d'un connecteur, deux fibres optiques, on voit apparaître des pertes ponctuelles dues à trois types de causes :

1. Réflexion de Fresnel aux deux interfaces (exp verre-air 8%) dans le cas des connecteurs, qu'on peut éviter en utilisant un liquide adaptateur d'indice, une autre technique consiste à polir les faces des fibres en biais, Pour éviter que la lumière réfléchie retourne dans la fibre.

2. Différence entre les paramètres des deux fibres (en principe identiques, mais en pratique à une certaines tolérance près).
3. Mauvais positionnement relatif : excentrement transversal, désalignement angulaire, écartement longitudinal.

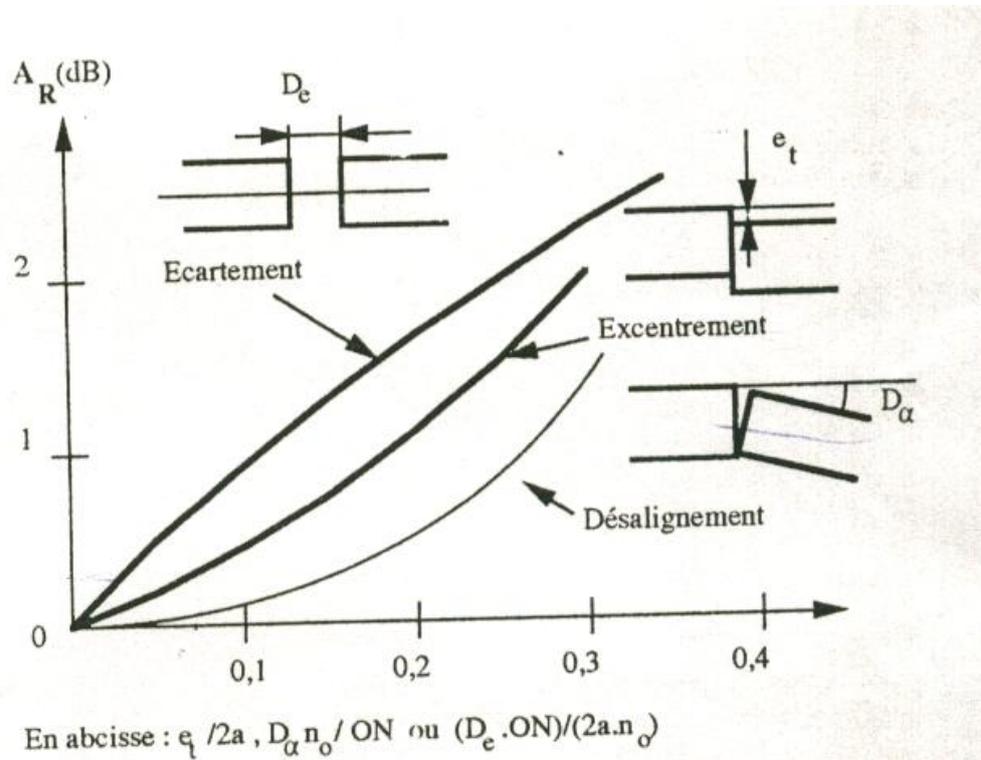


Figure 2.8: Pertes au raccordement des fibres multimodes [7]

2.5.1 Pertes par courbure et microcourbures

2.5.1-a Effet des courbures

En pratique, l'effet d'une courbure locale est négligeable lorsque le rayon de courbure R est grand devant un rayon de courbure critique R_c donné par :

Pour les fibres multimodes

$$R_c = \frac{2a \cdot n_1^2}{ON^2} \quad 2.23$$

Pour les fibres monomodes

$$R_c = 20 \frac{\lambda}{(n_1 - n_2)^{3/2}} \left(2,75 - \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad 2.24$$

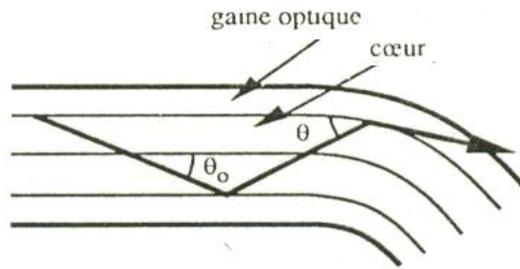


Figure 2.9: Effet des courbures [1]

Lorsque R n'est pas trop proche de R_c donc la perte due à la courbure :

$$\alpha_c (dB) = 10 \log \left(\frac{R}{R - R_c} \right) \quad 2.25$$

2.5.1-b Effet des microcambures

Il est plus complexe. Il dépend de la forme des déformations, l'amplitude, la répartition... etc. Il est en général étalonné expérimentalement.

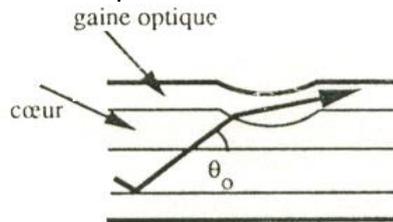


Figure 2.10: Effet des microcambures [1]

Une formule permet de prévoir l'atténuation linéique due aux mêmes microcambures pour une fibre donnée à partir de l'atténuation mesurée sur une fibre de référence. Donc nous parlons du rôle fondamental du revêtement de protection qui réduit les microcambures par amortissement de contraintes et empêche la casse de la fibre.