



# *Cours Communications Optiques*

---

**Chokri BACCOUCH**

# **Chapitre 1 : Généralités sur les Fibres Optiques**

## *Table des matières*

<b>CHAPITRE 1 : Généralités sur les Fibres Optiques.....</b>	<b>1</b>
<i>A. INTRODUCTION AUX COMMUNICATIONS OPTIQUES.....</i>	<i>1</i>
<i>B. LA PROPAGATION DANS LES FIBRES OPTIQUES .....</i>	<i>2</i>
I. PRESENTATION DE LA FIBRE OPTIQUE .....	2
II. METHODES D'ETUDE DE LA PROPAGATION SUR FIBRE OPTIQUE ET LIMITES D'UTILISATION .....	4
III. LA THEORIE DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE.....	5
III.1. Réflexion et réfraction de la lumière .....	5
III.2. Utilisation de la réflexion totale dans une fibre .....	6
III.3. Notion d'ouverture numérique .....	7
III.4. Fibre à saut d'indice .....	8
III.5. Fibre à gradient d'indice.....	9
IV. THEORIE ELECTROMAGNETIQUE .....	11
<i>C. CARACTERISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES .....</i>	<i>12</i>
I. ATTEUNATION .....	12
I.1. Pertes intrinsèques .....	13
I.2. Atténuation extrinsèque .....	16
II. DISPERSION .....	19
II.1. Dispersion intermodale .....	19
II.2. Dispersion chromatique.....	21
III. BANDE PASSANTE .....	23
D. CONCLUSION .....	24
<i>EXERCICES DU CHAPITRE 1 .....</i>	<i>25</i>

# **CHAPITRE 1 : Généralités sur les Fibres Optiques**

## **A. INTRODUCTION AUX COMMUNICATIONS OPTIQUES**

Le terme optoélectronique englobe tout dispositif ou système qui fait interagir des photons et des électrons. Le domaine spectral concerné ne se limite pas au domaine optique du visible ( $0,4 \mu m < \lambda < 0,75 \mu m$ ), mais s'étend de part et d'autre vers l'ultraviolet et l'infrarouge.

C'est au cours des dernières années que les dispositifs optoélectroniques et leurs applications ont connus un essor très important :

- Dans le domaine grand public, avec par exemple les caméscopes, les disques à lecteur laser et le stockage optique de l'information...
- Dans le domaine de communications optiques d'autre part, à cause du potentiel offert par ce secteur d'activités : télécommunications à grande distance, transmissions vidéo, réseaux numériques à intégration de services (RNIS), liaisons optiques entre ordinateurs.

L'optoélectronique recouvre donc de nombreux domaines de la physique (le guide d'onde, optique, laser, physique des semiconducteurs).

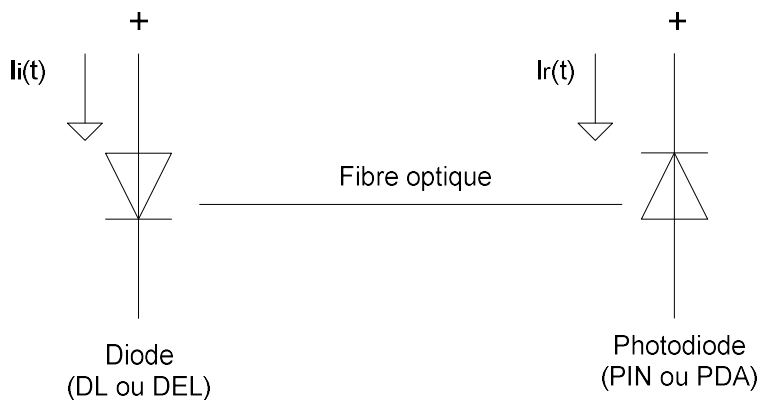
Le système de base utilisé pour les transmissions optiques comporte essentiellement (voir figure I.1) :

- Un émetteur : diode DEL ou diode Laser.

- Une fibre optique
- Un détecteur : Photodiode PIN ou à avalanche (PDA).

Par rapport aux communications hertziennes, les liaisons par fibres optiques présentent les avantages suivants :

- Faibles atténuations dans certaines « fenêtres spectrales »
- Bande passante supérieure au GHz
- Possibilités de multiplexage en longueur d'onde (transmission simultanée de plusieurs porteuses, à des fréquences légèrement différentes, sur la même fibre).
- Absence de rayonnement.
- Meilleure résistance à la corrosion que les câbles en cuivres en atmosphère ou dans l'eau de mer.



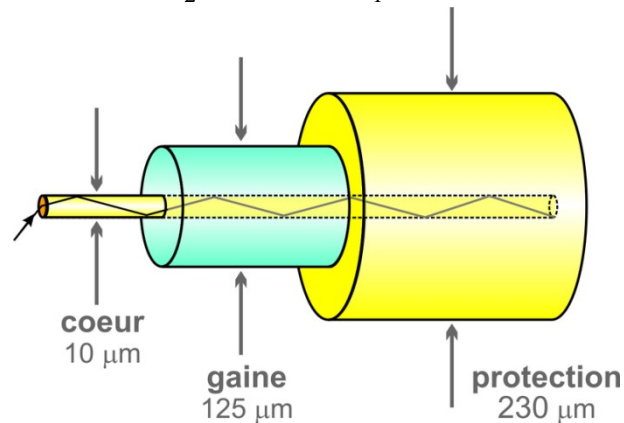
*Figure I.1. Liaison optique.*

## B. LA PROPAGATION DANS LES FIBRES OPTIQUES

### I. PRESENTATION DE LA FIBRE OPTIQUE

La partie *optiquement active* d'une fibre optique se présente, sous sa forme la plus classique (fibre multimode à saut d'indice),

comme un cylindre transparent, en verre de silice, avec une partie centrale appelée cœur; de rayon  $a$  et d'indice de réfraction  $n_1$  (de l'ordre de 1,45) et une partie concentrique située autour du cœur, appelée gaine, d'indice  $n_2$  inférieur à  $n_1$ .



**Figure I.2.** Géométrie de la fibre optique.

On rappelle que l'indice de réfraction  $n$  est égal à  $c/v$ , où  $c$  représente la vitesse de la lumière (des ondes électromagnétiques en général) dans le vide et  $v$  celle de la lumière dans le milieu considéré. La fibre est donc constituée de deux milieux *diélectriques* (un diélectrique est un isolant électrique) cylindriques concentriques comme représente par la figure I.2. Puis la fibre est entourée d'une jaquette de protection mécano-chimique en silicone et/ou en époxy acrylate, revêtement destiné à la protéger, à amortir les déformations et à augmenter sa durée de vie.

On peut classer les fibres optiques de deux façons différentes :

- Une fibre optique peut être *multimode* ou *monomode*, à *saut d'indice* ou à *gradient d'indice*.

- Une fibre optique multimode (respectivement monomode) véhicule simultanément plusieurs modes de propagation (resp. un seul mode de propagation). Cette notion de mode sera éclaircie ultérieurement.

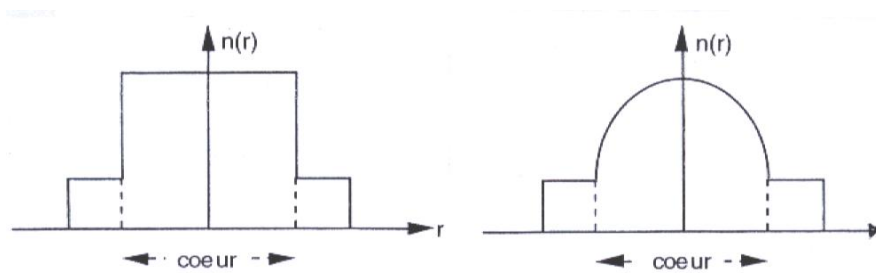
En termes de dimensions respectives de ces deux fibres, les diamètres du cœur et de la gaine optique d'une fibre multimode sont en général

de l'ordre de  $50\text{ }\mu\text{m}$  pour le cœur et de  $125\text{ }\mu\text{m}$  pour la gaine. La fibre multimode à gradient d'indice (la plus utilisée en télécommunications à moyenne distance) est appelée fibre  $50/125\text{ }\mu\text{m}$ . Il existe aussi les fibres  $62,5/125$  utilisées en informatique et  $85/125$  utilisées pour les vidéocommunications.

Les valeurs typiques du diamètre d'une fibre monomode sont de  $4\text{ }\mu\text{m}$  à  $8\text{ }\mu\text{m}$  pour le cœur et de  $125\text{ }\mu\text{m}$  pour la gaine optique. On remarque qu'effectivement, bien que le diamètre du cœur d'une fibre monomode soit beaucoup plus petit que celui d'une fibre multimode. Leur diamètre de gaine est le même.

La jaquette de protection entourant la fibre optique peut avoir un diamètre extérieur de  $150\text{ }\mu\text{m}$  à  $250\text{ }\mu\text{m}$ .

-Les fibres optiques à saut d'indice ou à gradient d'indice différent se distinguent, comme leur nom l'indique, par leur profil d'indice comme l'indique la figure I.3 :



*a. Fibre à saut d'indice      b. Fibre à gradient d'indice*

**Figure I.3.** Profil d'indice.

## II. METHODES D'ETUDE DE LA PROPAGATION SUR FIBRE OPTIQUE ET LIMITES D'UTILISATION

On peut étudier la propagation dans une fibre optique de deux façons différentes : par la théorie des rayons (ou optique géométrique), ou par la théorie électromagnétique.

Le principe du guidage de la lumière par une fibre optique repose sur les lois qui régissent la réflexion et la réfraction des rayons lumineux à

la surface séparant deux diélectriques d'indices différents. On parle de *théorie des rayons*, relativement simple et permettant donc une première compréhension du phénomène de propagation.

Une étude plus rigoureuse passe par la résolution des équations de Maxwell, puisque la lumière est une forme d'onde électromagnétique. Cette approche par *la théorie électromagnétique*, plus complète, est aussi beaucoup plus complexe.

*Quand peut-on se contenter de l'approximation "rayons", quand est-elle utilisable ? Quand, au contraire doit-on obligatoirement utiliser la théorie électromagnétique ? Quelles sont les limites de ces deux approches ?*

- Quand les longueurs d'onde utilisées [qui sont situées pour les fibres en verre de silice dans le proche infrarouge, c'est-à-dire autour de  $1\text{ }\mu\text{m}$ , (en fait  $0,85\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1,3\text{ }\mu\text{m}$  et  $1,55\text{ }\mu\text{m}$ ), ce qui correspond à des fréquences optiques de l'ordre de 300 Téra-Hertz] restent très courtes vis-à-vis de la dimension du guide optique (en l'occurrence du cœur de la fibre), on peut raisonner en termes de théorie des rayons. C'est typiquement le cas pour les fibres multimodes dont le diamètre du cœur est de l'ordre d'une cinquantaine de  $\mu\text{m}$ .

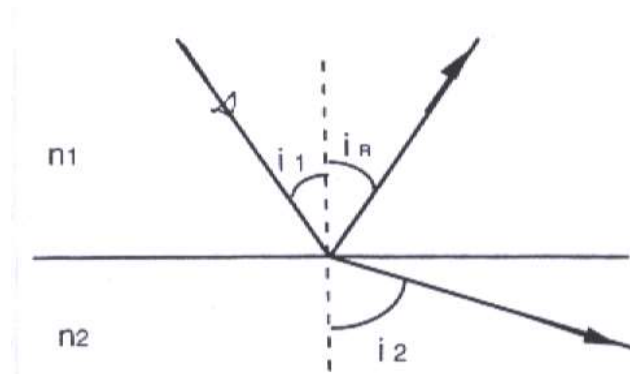
- Quand les longueurs d'onde utilisées sont de l'ordre de grandeur de la dimension du guide optique (en l'occurrence du cœur de la fibre), on est obligé d'utiliser la théorie électromagnétique. C'est typiquement le cas pour les fibres monomodes dont le diamètre de cœur est de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$ .

### III. LA THEORIE DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE

#### III.1. Réflexion et réfraction de la lumière

Considérons la surface plane  $S$  séparant deux diélectriques transparents d'indices respectifs  $n_1$  et  $n_2$  avec  $n_1 > n_2$  et considérons un rayon incident arrivant au point  $P$  en faisant un angle  $i_1$  avec la normale à la surface. Il se partage alors en deux rayons, réfléchi et réfracté, comme on peut le voir sur la figure I.4.





**Figure I.4.** Réflexion et réfraction de la lumière.

Selon *les lois de Descartes*, on a :

$$i_R = i_1 \quad (\text{I.1})$$

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2 \quad (\text{I.2})$$

Comme  $n_1 > n_2$ , on a  $i_2 > i_1$  et lorsque  $i_1$  croît,  $i_2$  augmente aussi jusqu'à la valeur limite  $90^\circ$ , qui correspond à l'angle  $i_{1L}$  dit "*angle limite*" défini par :

$$\sin i_{1L} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{I.3})$$

Au-delà de cette valeur d'incidence, il n'y a plus de réfraction et la *totalité* de la puissance incidente est réfléchiée par la surface (contrairement à la réflexion sur un miroir métallique qui s'effectue avec environ 10 % de perte de la puissance lumineuse).

On parle de **réflexion totale interne** : *Quand le milieu incident présente l'indice le plus élevé, la lumière y reste confinée dès que l'angle d'incidence est supérieur ou égale à l'angle limite correspondant à la réflexion totale. C'est ce principe qui est utilisé pour piéger la lumière dans une fibre optique.*

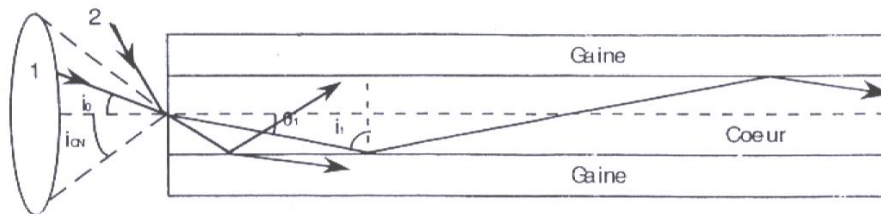
### III.2. Utilisation de la réflexion totale dans une fibre

Dans la coupe de la figure I.5, le rayon 1, provenant de l'air d'indice égal à 1, subit en pénétrant dans le cœur de la fibre d'indice

environ égale à 1,5 une première réfraction qui le rapproche de l'axe de propagation de la fibre.

Si, dans le cœur, l'angle  $i_1$  du rayon est supérieur à l'angle limite de réflexion totale  $i_{1L}$ , il se produit une réflexion totale à la surface de la gaine. Le rayon continu ensuite à se propager *sans perte* dans le cœur puisque toutes les réflexions successives s'effectuent sous le même angle (*confinement de la lumière dans le cœur*).

Au contraire, un rayon tel que le rayon 2, qui présente avec la normale à l'interface cœur-gaine, un angle inférieur à  $i_{1L}$ , ne subit qu'une réflexion partielle avec perte d'énergie utile dans la direction de propagation. Après plusieurs réflexions de ce type, il s'atténue de plus en plus jusqu'à disparaître et ne se propage donc pas dans la fibre.



**Figure I.5.** Réflexion totale dans une fibre à saut d'indice

L'angle  $i_{ON}$  délimite l'inclinaison maximale des rayons incidents (on parle de cône d'acceptance de la fibre) pour que ceux-ci puissent se propager dans le cœur de la fibre.

### III.3. Notion d'ouverture numérique

On appelle *Ouverture Numérique (ON)* la quantité :

$$ON = \sin i_{ON} . \quad (I.4)$$

D'après les lois de Descartes, on a à l'interface air-cœur la relation :

$$\sin i_{ON} = n_1 \sin \theta_1$$

Or :  $\theta_1 = 90^\circ - i_{1L}$

D'où :  $\sin \theta_1 = \cos i_{1L} .$

Donc :  $\sin i_{ON} = n_1 \cos i_{1L} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$

et :  $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  (I.5)

Cette notion d'ouverture numérique est extrêmement importante car elle correspond à la propriété qu'a une fibre de collecter la lumière pour la propager.

**Exemple :** Une fibre possédant une ouverture numérique de 0,3 va propager toute lumière arrivant sur sa face d'entrée avec un angle inférieur à  $\arcsin(0,3)$ . C'est-à-dire inférieur à  $17^\circ$  environ.

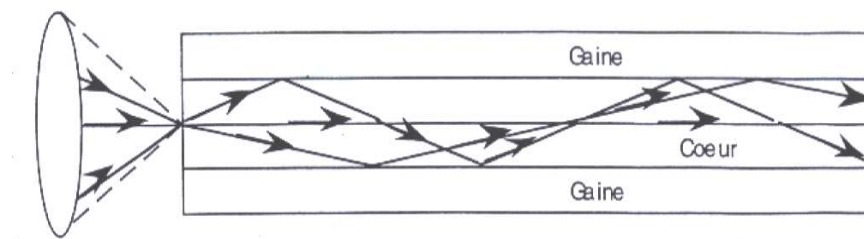
Plus l'ouverture numérique est grande, plus la quantité de lumière pouvant entrer dans la fibre est grande.

Il est à noter que cette ouverture numérique ne dépend que des indices de réfraction du cœur et de la gaine et non de leurs dimensions.

#### III.4. Fibre à saut d'indice

En fait, le calcul qui vient d'être mené n'est rigoureux que si on travaille avec une fibre *multimode à saut d'indice*, c'est-à-dire une fibre de cœur d'indice  $n_1$  *constant* et de gaine d'indice  $n_2$  *constant*. Le "saut" d'indice se faisant à la surface de séparation des deux milieux.

La *trajectoire* des rayons lumineux dans une telle fibre à saut d'indice a l'allure schématisée par la figure suivante (figure I.6).



**Figure I.6.** Trajectoire des rayons dans une fibre à saut d'indice.

Pour une telle fibre à saut d'indice l'ouverture numérique est la même sur toute la face d'entrée correspondant au cœur, puisque l'indice de ce cœur est constant.

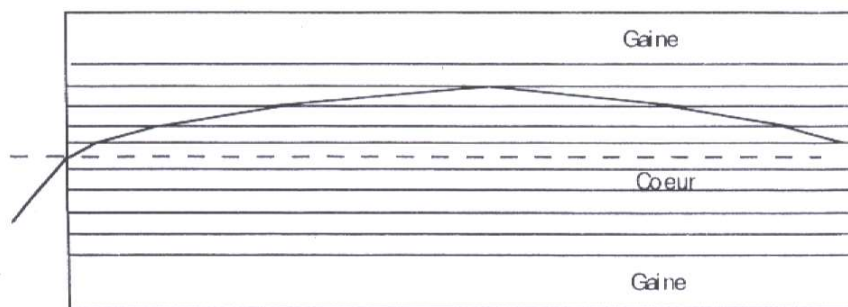
### III.5. Fibre à gradient d'indice

On a vu qu'une variation progressive d'indice est également possible, le passage de  $n_1$  à  $n_2$  s'effectuant par petits sauts successifs d'indice du centre du cœur vers la gaine : on parle alors de fibre *multimode à gradient d'indice*. La fibre à gradient d'indice à *profil optimisé* est la fibre à *profil parabolique*.

Pour étudier la trajectoire d'un rayon lumineux dans une fibre à gradient d'indice, on décompose la zone de transition en un grand nombre de couches élémentaires très minces ayant chacune un indice constant (ce qui correspond d'ailleurs à la réalité technologique de fabrication de ce type de fibre).

Le rayon incident représenté par la figure I.7, se présentant dans le cône d'acceptance de la fibre, rencontre des couches d'indices décroissant et, en conséquence, s'incurve de plus en plus vers l'horizontale. La réflexion totale ne se produit que lorsque le rayon arrive sur l'interface entre deux couches adjacentes d'indices respectifs  $n$  et  $n - \Delta n$  avec un angle  $\theta$  supérieur ou égal à  $\arcsin\left(\frac{n - \Delta n}{n}\right)$ . Il

subit alors, dans une couche plus ou moins profonde, une réflexion totale et revient en s'incurvant à nouveau vers le centre de la fibre où il subit les réfractions inverses à celles de l'aller...



**Figure I.7.** Réflexion totale dans une fibre à gradient d'indice

Le rayon a donc une courbure graduelle et comme il y a un grand nombre de couches, on conçoit ainsi, qu'à la limite, quand l'indice varie de façon continue ou quand les couches sont suffisamment minces, la trajectoire, au lieu d'être faite de variations d'angles successives et faibles, devient une courbe continue.

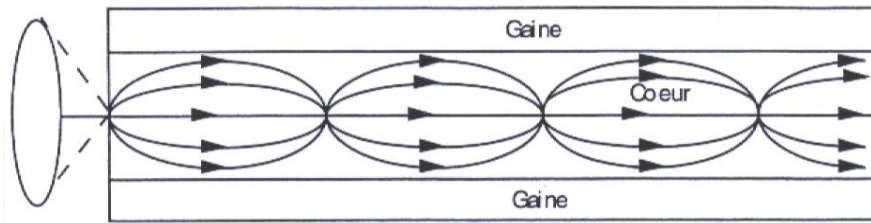
Si l'angle d'incidence  $i_0$  par rapport à la face d'entrée de la fibre est plus faible, la réflexion totale se produit plus tôt et le rayon lumineux reste plus près du centre du cœur.

Les trajectoires, pour une fibre à gradient d'indice à profil d'indice optimisé parabolique, ont donc l'allure sinusoïdale montrée sur la figure I.8 (avec ce profil optimisé, les différences de longueur des trajectoires sont à peu près compensées par les différences de vitesse, étant donné que  $v = c/n$  et que  $n$  décroît quand on se rapproche de la gaine).

On ne peut définir, pour une telle fibre, qu'une *ouverture numérique locale* car l'indice de réfraction du cœur est une fonction de la distance  $r$  à l'axe.

On a: 
$$ON_{loc} = \sqrt{n_1(r)^2 - n_2^2} = ON(r) \quad (I.6)$$

Cette ouverture numérique est maximale au centre du cœur et décroît quand le rayon incident est plus proche de la gaine.



**Figure I.8.** Trajectoire des rayons dans une fibre à gradient d'indice.

On peut en déduire qu'une fibre optique à gradient d'indice capte moins de puissance lumineuse qu'une fibre optique à saut d'indice. Son avantage réside ailleurs...

Les documents constructeurs donnent pour ouverture numérique d'une telle fibre son ouverture numérique maximale, soit :  $ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ .

On a pour une fibre à gradient d'indice:

$$n_1(r) = n_1(0) \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} \quad (\text{I.7})$$

Avec  $\alpha$  : coefficient de profil

- $\alpha = 1$  : profil triangulaire ;
- $\alpha = 2$  : profil parabolique optimisé ;
- $\alpha = \infty$  : profil à saut d'indice.

$\Delta$  : est appelé différence d'indice relative.

Si la différence entre les indices du cœur  $n_1$  et de la gaine  $n_2$  est très faible, ce qui est toujours le cas, on utilise le paramètre  $\Delta$ , appelé différence d'indice relative, défini par :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (\text{I.8})$$

$\Delta$  est en général de l'ordre de 1% à 1 pour mille. On peut alors écrire l'ouverture numérique :

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)} \approx \sqrt{2\Delta n_1^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (\text{I.9})$$

On vient de voir que, pour une fibre à saut d'indice ou bien au centre d'une fibre à gradient d'indice, on a :  $ON \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$ . L'ouverture numérique est d'environ 0,2 à 0,3 pour les fibres multimodes (ce qui correspond à un angle maximum d'injection de  $11^\circ$  à  $17^\circ$  par rapport à la direction de propagation, c'est-à-dire à l'axe de la fibre) et d'environ 0,1 pour les monomodes (ce qui correspond à un angle maximum d'injection de  $6^\circ$ ).

#### IV. THEORIE ELECTROMAGNETIQUE : (Nombre des modes)

On définit comme pour le guide d'onde plan le paramètre  $V$  (ou épaisseur normalisée).

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot (ON) = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (\text{I.10})$$

avec  $V$ : la fréquence normalisée de la fibre.

- Le nombre de modes  $M$  est plus grand que dans le cas du guide plan, du fait du confinement latéral.

On montre que  $M$  est donné par:

- Pour une fibre à saut d'indice: ( $\alpha \rightarrow \infty$ ) :  $M = \frac{V^2}{2}$  ;
- Pour une fibre à gradient d'indice à profil parabolique ( $\alpha = 2$ ):  

$$M = \frac{V^2}{4}$$
 ;
- Pour une fibre à gradient d'indice de paramètre  $\alpha$  quelconque:  

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

- Le nombre de modes diminue avec le rayon du cœur de la fibre  $a$ .

La résolution rigoureuse des équations de propagation en géométrie cylindrique permet de montrer que pour  $V < 2,405$ , seul le mode fondamental  $LP_{0,1}$  peut se propager.

Dans ce cas  $f < f_C^{01}$  : fréquence de coupure du 1<sup>er</sup> mode avec:

$$f_C^{01} = \frac{2,405 \cdot c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_{1r} - \epsilon_{2r}}} = \frac{2,405 \cdot c}{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (I.11)$$

avec  $n = \sqrt{\epsilon_r}$ . Le rayon «  $a$  » d'une fibre monomode est donné par:

$$a \leq \frac{2,405 \cdot \lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \rightarrow a \leq 1,20 \frac{\lambda}{\pi \cdot (ON)} \quad (I.12)$$

Ces fibres monomodes sont d'un intérêt primordial pour les communications optiques.

## C. CARACTERISTIQUES DES FIBRES OPTIQUES

### I. ATTEUNATION

L'atténuation (qui représente l'affaiblissement en terme d'amplitude ou d'intensité, voir figure I.9) est un paramètre très important car c'est elle qui *limite les portées de transmission*. On a donc intérêt à minimiser, dans la mesure du possible, cette atténuation et comprendre ses origines.

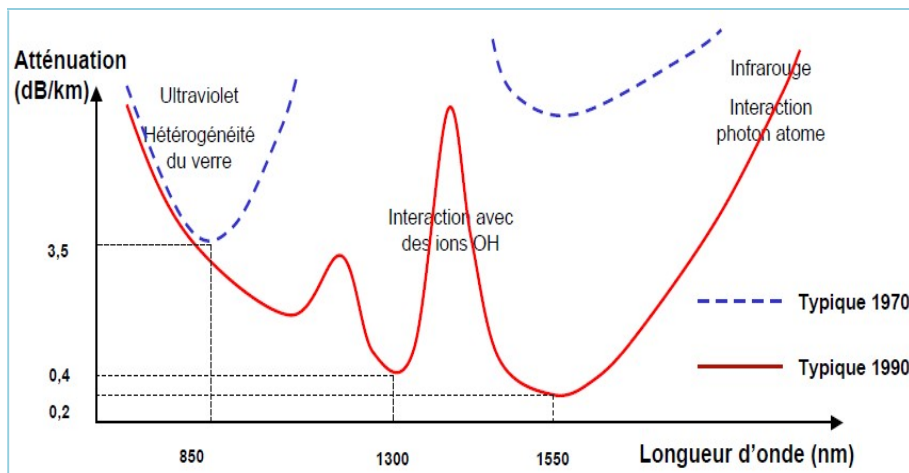


**Figure I.9.** Atténuation d'un signal

## I.1. Pertes intrinsèques

### I.1.1. Atténuation linéique

L'atténuation linéique d'une fibre optique dépend du matériau de constitution de la fibre et de la longueur d'onde à laquelle la transmission va se faire, appelée longueur d'onde d'utilisation. L'atténuation s'exprime en  $dB/km$ .



**Figure I.10.** Courbe d'atténuation spectrale intrinsèque d'une fibre monomode en verre de silice [1].

La courbe d'atténuation spectrale intrinsèque d'une fibre monomode en verre de silice est représentée par la figure I.10.

On observe deux minimums d'atténuation :

$0,35 \text{ dB/km}$  à  $1,3 \mu\text{m}$

$0,17 \text{ dB/km}$  à  $1,55 \mu\text{m}$ .



**N.B :**

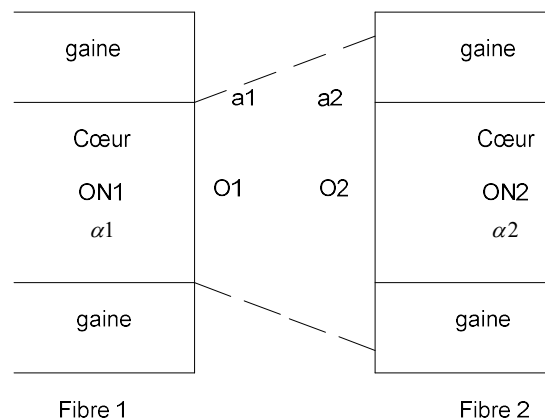
- Dans les années 1970, le minimum d'atténuation était à 0,85  $\mu\text{m}$ .
- l'atténuation du verre à vitre classique est de 10.000 dB/km.
- à 1,55  $\mu\text{m}$  la dispersion (déformation) est plus grande que celle à 1,3 $\mu\text{m}$ .

• ***Les causes des ces atténuations:***

- *L'absorption* (dû à l'interaction lumière / matière)
- *La présence d'eau* (en quantité infinitésimale !) dans le verre, donc d'ions  $\text{OH}^- \Rightarrow$  perte par absorption  $\rightarrow$  d'où les pics localisés.
- Les pertes par diffusion (en  $1/\lambda^4$ ) : *diffusion de Rayleigh* dus au fluctuation de la densité du matériau et au fluctuation de la concentration en dopants présents dans le verre.

La fibre optique est garantie pour un fonctionnement normal égal ou supérieur à 25 ans, ceci montre encore une fois l'énorme intérêt d'utiliser les fibres optiques comme support de transmission.

**I.1.2. Pertes intrinsèques** (*dues aux différences entre paramètres caractéristiques des fibres connectés*).



**Figure I.11.** Paramètres caractéristiques de deux fibres connectées.

La fibre 1 est en avant de la fibre 2.

**a- Différence de diamètre de cœur**

$S_1 = \pi a_1^2$  et  $S_2 = \pi a_2^2$ , avec  $S_1 \succ S_2$ .

$a_1$  et  $a_2$  sont les rayons respectivement de la fibre 1 et 2.

La perte de surface est :  $p_S = 10 \log \frac{S_2}{S_1} = 20 \log \frac{a_2}{a_1}$ . (I.13)

**b- Différence d'ouverture numérique**

$ON_1 = (\sin \theta_1)^2$  et  $ON_2 = (\sin \theta_2)^2$ , avec  $ON_1 \succ ON_2$ .

La perte de ON est :  $p_{ON} = 10 \log \frac{ON_2}{ON_1} = 20 \log \frac{\theta_2(\text{radians})}{\theta_1(\text{radians})}$ . (I.14)

Si  $ON_1 \succ ON_2 \Rightarrow$  pertes, car il y aura des rayons lumineux qui sont dans la fibre 1 et ne peuvent pas se propager dans la fibre 2.

**c- Différence de coefficient de profil d'indice**

$\alpha_1$  = coefficient de profil 1 et  $\alpha_2$  = coefficient de profil 2, avec  $\alpha_1 \succ \alpha_2$ .

La perte de coefficient de profil d'indice est :

$$p_\alpha = 10 \log \frac{\left( \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + 2} \right)}{\left( \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + 2} \right)}. \quad (\text{I.15})$$

On a :  $N = \frac{\alpha}{\alpha + 2}$  : le nombre de modes. Si  $\alpha$  augmente, alors  $N$  diminue.

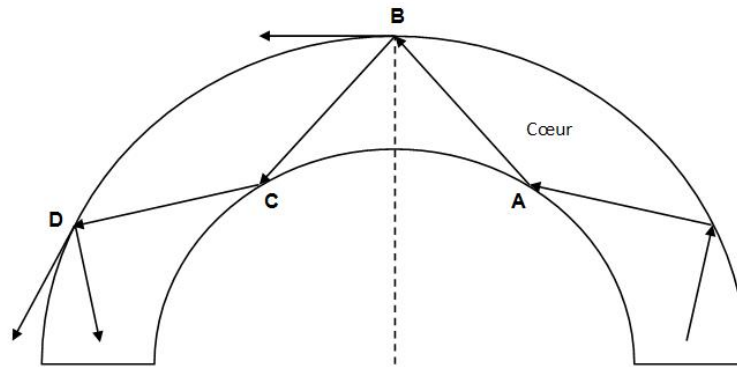
**I.2. Atténuation extrinsèque :** Qui provient de la façon dont la liaison est mise en œuvre.

### **I.2.1. Pertes dues aux courbures**

Courbures  $\Rightarrow$  la réflexion totale n'est pas respectée  $\Rightarrow$  il y aura des réfractions  $\Rightarrow$  Lumière perdue dans la gaine (figure I.12).

Il faut que le rayon de courbure  $R \prec R_{\text{Critique}} = 10 \text{ cm}$ . Si non, les pertes augmentent considérablement.

Typiquement :  $R_{\text{max}}(\text{Courbure}) = 45 \text{ mm}$  pour multimode  
 $R_{\text{max}}(\text{Courbure}) = 20 \text{ mm}$  pour monomode.



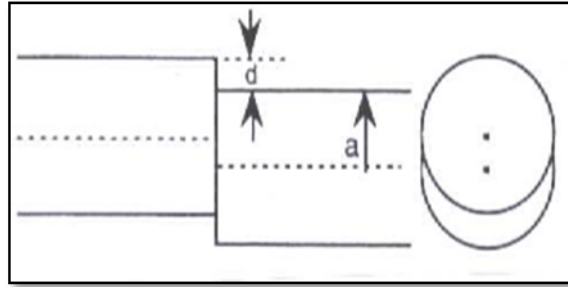
**Figure I.12.** Pertes dues aux courbures.

**I.2.2. Pertes dues aux connexions** (dues aux mauvais positionnements des fibres connectées, supposées identiques).

- Raccordement des câbles par des *épissures*
- Les deux extrémités sont reliées aux équipements terminaux par des *connecteurs* qui eux sont démontables.

**a- Décalage axial :** Le transfert de flux énergétique se fait uniquement pour les portions de cœur qui coïncident (Fig. I.13).

$d = O_1O_2$  est la distance entre les axes des fibres.  $a$  est le rayon de la fibre.



**Figure I.13.** Décalage axial des fibres.

La perte due au décalage axial est donnée par [1]:

$$p_{d/2a} = 10 \log \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{d}{2a} \right) - \frac{2}{\pi} \left( \frac{d}{2a} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{d}{2a} \right)^2} \right]. \quad (\text{I.16})$$

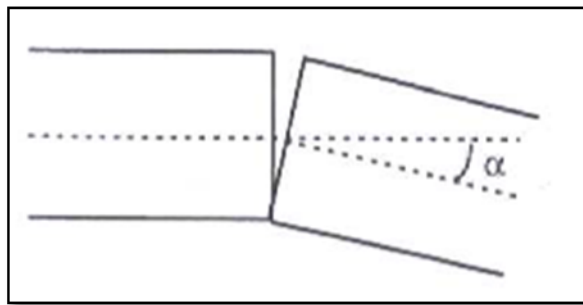
#### ***b- Décalage angulaire***

$\alpha$  : angle de désalignement angulaire des fibres.

$\theta$  : angle d'acceptance du à l'ouverture numérique.

Le flux énergétique couplé est proportionnel à l'angle solide

$$\Omega_2 = 2\pi (1 - \cos(\theta - \alpha)).$$



**Figure I.14.** Pertes dues au décalage angulaire.

Le flux énergétique émis par la fibre 1 est proportionnel à  $\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos \theta)$ .

La perte due au décalage angulaire est donnée par :

$$p_{angulaire} = 10 \log \frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{1 - \cos \theta} \approx 10 \log \frac{(\theta - \alpha)^2}{\theta^2} \quad (I.17)$$

$$\approx 10 \log \left(1 - \frac{\alpha}{\theta}\right)^2$$

**c- Distance entre deux fibres** (sans tenir compte des pertes de Fresnel dues aux changements d'indice).

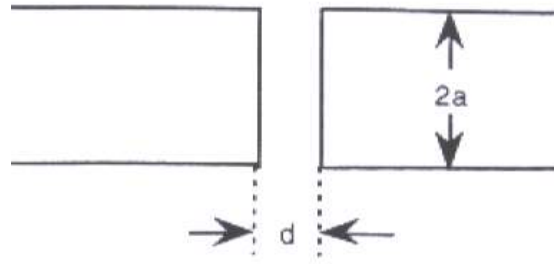
$S = \pi a^2$  : surface du cœur.

$S_{ecl} = \pi(a + d \cdot \tan \theta)^2$  : surface éclairée par la fibre 1 à l'entrée de la fibre 2.

$\theta$  : angle correspondant à l'ON.

La perte due à la distance entre les deux fibres :

$$p_d = 10 \log \frac{a^2}{(a + d \cdot \tan \theta)^2} = 10 \log \left(1 + \frac{d}{a} \tan \theta\right)^{-2} \quad (I.18)$$



**Figure I.15.** Pertes dues à la distance entre deux fibres.

**N.B** : Plus l'ON est grande, plus les pertes de connexion sont minimisées. Cependant, l'ON baisse la bande passante ; c'est donc un problème de *compromis* (cahier de charge).

## II. DISPERSION

La dispersion est la *déformation* ou *distorsion* du signal : élargissement des impulsions.

- pour éviter l'interférence inter-symbole (mélange des réponses des impulsions), il faut réduire le débit en ligne (rapidité de modulation) de la transmission, c.à.d. diminuer l'intervalle de temps entre deux impulsions successives. Ce qui limite de façon simultanée la capacité de la transmission, c.à.d. le débit binaire.
- D'autre part on doit reconnaître le signal émis.

\* Pour limiter cette déformation, on réalise une adaptation (critère de Nyquist) entre le signal à transmettre et la bande passante de la fibre optique.

$$B_{\min} = R/2 : \text{théorique ;}$$

$$B_{\min} = 0,7R : \text{en pratique ; avec } R = 1/\Delta t : \text{débit binaire.}$$

### II.1. Dispersion intermodale (ou modale)

#### II.1.1. Fibre optique à saut d'indice



**Figure I.16.** Elargissement temporel d'un signal dans une fibre.

L'étalement (fig. I.16) dans le temps (élargissement temporel), qui est la différence du temps entre les trajets, pour une fibre à saut d'indice est donnée par

$$\Delta t_{im} = \frac{L}{2c} \cdot \frac{ON^2}{n_1} = \frac{L \cdot n_1 \Delta}{c} \quad (I.19)$$

Donc, si l'ON diminue, la dispersion modale diminue. D'autre part, si l'ON diminue, la puissance injectée dans la fibre diminue.  $\Rightarrow$  Il faut donc, un compromis.

Pour remédier à ce problème il y a deux solutions :

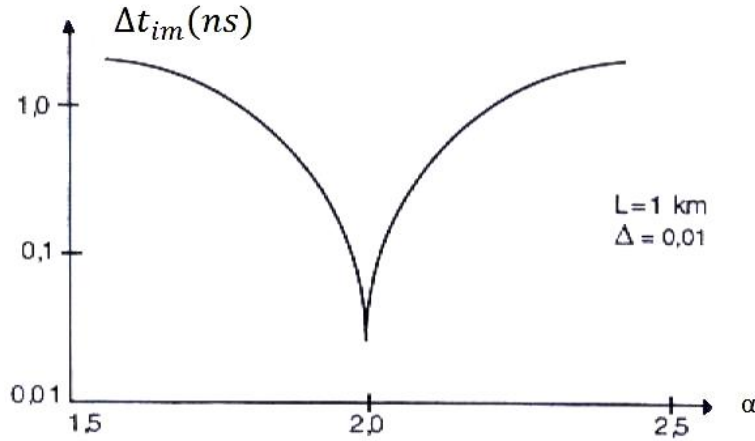
- Travailler avec une F.O monomode
- Travailler avec une F.O à gradient d'indice (pour que les rayons qui ont à faire une plus grande distance se propagent plus rapidement pour cela, on *modélise le profil d'indice* :

Pour une fibre à gradient d'indice, l'indice du cœur varie suivant l'équation (I.7). Le profil qui *minimise* la dispersion intermodale a un  $\alpha$  très voisin de 2, et est donc *parabolique* (fig. I.17).

Pour une telle fibre à gradient d'indice, la dispersion intermodale (s'exprime en seconde) est donnée par [2] :

$$\Delta t_{im} = \frac{L}{32c} \cdot \frac{ON^4}{n_1^3} \prec \Delta t_{im/Saut\ d'indice} \quad (I.20)$$

$$\Delta t_{i.m/Optimale} = \frac{L \cdot n_1}{8c} \cdot \Delta^2; \quad n_1 = n_1(o) \quad (I.21)$$



**Figure I.17.** Variation de la dispersion intermodale en fonction de  $\alpha$ .

### Application numérique :

Pour :  $L = 1 \text{ km}$ ,  $n_1 = 1,53$  et  $\Delta = 0,03$ , le calcul donne :

- Fibre à saut d'indice:

$$\Delta t_{i.m} = \frac{1.(1,53).0,03}{3.10^5} = 153 \text{ ns}$$

- Fibre à gradient d'indice parabolique:

$$\Delta t_{i.m/optimale} = \frac{(1,53).9.10^{-4}}{8.(3.10^5)} = 0,57 \text{ ns}.$$

N.B : 
$$\frac{\Delta t_{Opt}}{\Delta t_{Saut \text{ d'indice}}} = \frac{\Delta}{8}.$$

## **II.2. Dispersion chromatique**

Les fibres monomodes présentent uniquement la dispersion chromatique. La dispersion chromatique met en cause *la longueur d'onde  $\lambda$*  de la lumière.

### **II.2.1. Dispersion du matériau**

Les sources de lumière utilisées ne sont pas monochromatique. Elles ont une certaine largeur spectrale  $\Delta\lambda$  (exprimée en nm; fig.I.18).

Or :  $n = n(\lambda) \Rightarrow v = \frac{c}{n} = v(\lambda) ;$

$\Rightarrow$  Il y a un phénomène d'étalement dans le temps (pour multimode ou monomode) dû à la variation de *la vitesse de phase* de la lumière en fonction de la longueur d'onde. Cette dispersion du matériau est donnée par :

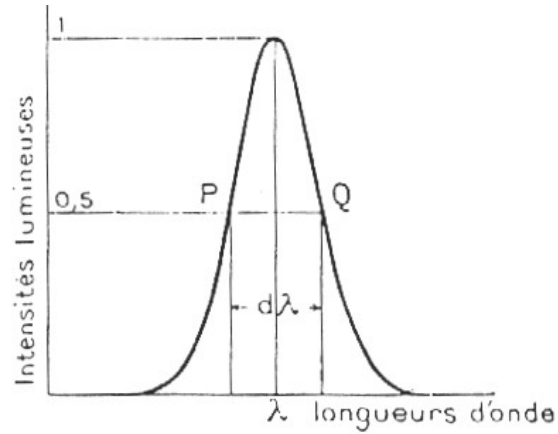
$$\Delta t_m = D_m(\lambda). \Delta\lambda.L \quad (\text{I.22})$$

avec

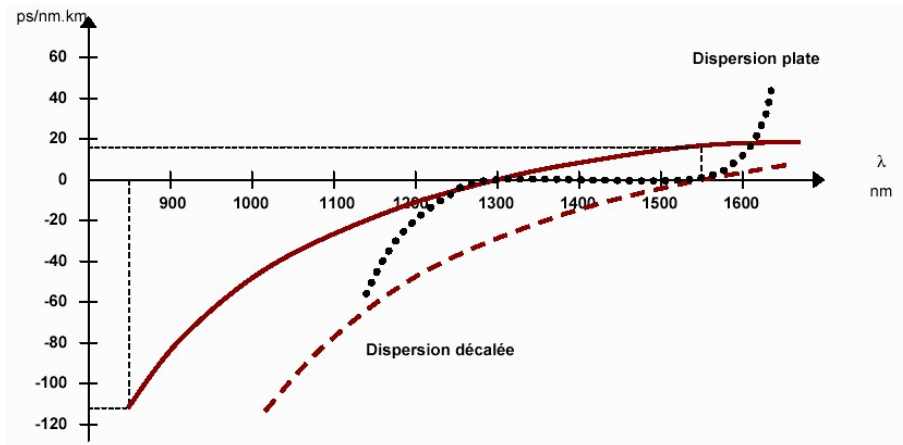
$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \cdot \left( \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) \quad (\text{I.23})$$



$D_m$  : est le coefficient de dispersion du matériau (fig. I.19) et s'exprime en  $ps.nm^{-1}.km^{-1}$ .



**Figure I.18.** Largeur spectrale d'une source.



**Figure I.19.** Variation du coefficient de dispersion matériau en fonction des longueurs d'ondes [1].

### II.2.2. Dispersion du guide d'onde: (dispersion intra-modale)

La *vitesse du groupe* de chaque mode ( $v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$ ) est une fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente  $v_g = f(\lambda)$ . La dispersion du matériau dû à cette variation de vitesse est donnée par :

$$\Delta t_g = D_g(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L \quad (I.24)$$

Avec  $D_g$  : est le coefficient de dispersion du guide et s'exprime en  $ps.nm^{-1}.km^{-1}$ .

### II.2.3. Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est causée par la variation de l'indice du matériau du cœur en fonction des longueurs d'ondes. Par suite Cette dispersion est donnée par :

$$\Delta t_{chro} = \Delta t_m + \Delta t_g \quad (I.25)$$

Ou bien :

$$\Delta t_{chro} = D(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L \quad (I.26)$$

Avec :  $D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_g(\lambda)$  est le coefficient de dispersion chromatique.

#### **N.B :**

à  $\lambda = 1,3 \mu m$ ,  $D(\lambda) = 3,5 ps / nm.km \rightarrow \Delta t_{Chr} = 0$  ;

Donc pour diminuer  $\Delta t_{Chr}$ , on travaille avec des sources à faible largeur spectrale  $\Delta \lambda$ , comme la diode laser ( $\Delta \lambda = 1 nm$ ), ou la D.L telle que DFB et DBR ( $\Delta \lambda = 0,01 nm$ ). Pour les diodes électroluminescentes (DEL)  $\Delta \lambda = 100 nm$ .

## III. BANDE PASSANTE

La dispersion totale dans une fibre optique est donnée par :

$$\Delta t_{tot} = \sqrt{\Delta t_{im}^2 + \Delta t_{chr}^2} \quad (I.27)$$

Pour une impulsion de forme gaussienne la bande passante est donnée par:

$$B = \frac{0,35}{\Delta t_{tot}} \quad (I.28)$$

On a :

$$\frac{1}{B^2} = \frac{1}{B_{im}^2} + \frac{1}{B_{chr}^2} \quad (I.29)$$

avec

$$B_{im} = \frac{0,35}{\Delta t_{im}} \text{ et } B_{chr} = \frac{0,35}{M(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L} \quad (I.30)$$

## D. CONCLUSION

Compte tenu des limitations évoquées dans ce qui précède, il faut tout de même retenir que la fibre optique est le support de transmission présentant de loin *la plus faible atténuation* (applications de transport) et *la plus grande bande passante* (applications de transport et de distribution).

L'optique est donc, dans l'état actuel des connaissances, le seul moyen adapté aux communications multi-gigabits d'aujourd'hui et de demain. L'application à grande échelle de la fibre comme moyen de distribution présente un grand intérêt (essentiellement pour sa capacité de transmission) et fait l'objet des recherches très actives.

## **EXERCICES DU CHAPITRE 1**

### **Exercice 1**

L'indice optique du cœur d'une fibre optique à saut d'indice est  $n_2 = 1,475$ . L'indice de la gaine est  $n_1 = 1,472$ .

- 1) Calculer l'ouverture numérique ON.
- 2) Calculer l'écart relatif des indices  $\Delta$ .
- 3) Montrer que l'angle d'acceptance ( $i_C$ ) à l'entrée de la fibre est donnée par :

$$\sin i_C = \frac{ON}{n_0}, \text{ où } n_0 \text{ est l'indice de l'air. Calculer } i_C.$$

### **Solution**

- 1) L'ouverture numérique est donnée par :

$$ON = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

$$ON = \sqrt{(1,475)^2 - (1,472)^2} ; \text{ soit : } ON = 0,094.$$

- 2) L'écart relatif des indices s'écrit :

$$\Delta = \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_2^2} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2}$$

$$\Delta = \frac{(1,475)^2 - (1,472)^2}{2(1,475)^2} ; \text{ soit : } \Delta = 0,002.$$

- 3) \* La loi de Descartes pour la réfraction à l'interface air-cœur (en O) s'écrit :

$$n_0 \sin(i) = n_2 \sin(\theta) ; \text{ avec :}$$

$i$  : angle d'incidence à l'entrée de la fibre en O.

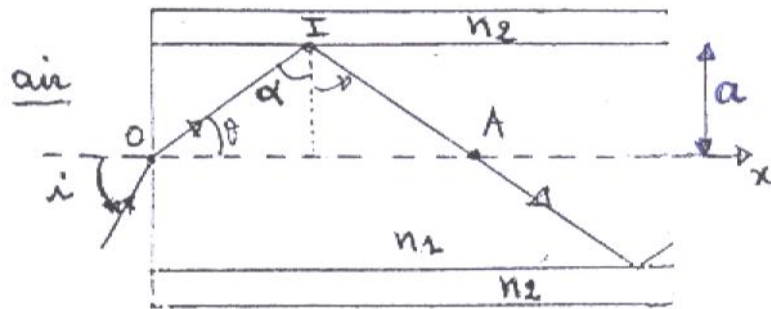
$\theta$  : angle de réfraction en O (voir figure ci-dessous).

\* La loi de Descartes pour la réflexion à l'interface cœur-gaine (en I) s'écrit :

$\alpha = \alpha'$  ; avec :

$\alpha$  : angle d'incidence en I.

$\alpha'$  : angle de réflexion en I (voir figure ci-dessous).



**Figure I.20.** Propagation de la lumière dans une fibre à saut d'indice

De plus, dans le triangle  $O\hat{B}I$  on a :  $\alpha + \theta = 90^\circ$ .

Pour confiner la lumière dans le cœur, il faut réaliser la réflexion totale en I.  $\Rightarrow \alpha \geq \alpha_L$ .

Avec  $\alpha_L = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$  : angle limite d'incidence en I.

Si  $\alpha = \alpha_L$ , alors  $\theta = \theta_L = 90^\circ - \alpha_L$ . D'où :

$$n_0 \sin(i_c) = n_2 \sin(\theta_L) = n_2 \cos(\alpha_L)$$

$$\begin{aligned} n_0 \sin(i_c) &= n_2 \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\right) \\ &= n_2 \sqrt{1 - \sin^2\left(\sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\right)} \end{aligned}$$

$$= n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = ON$$

Par suite :  $\sin(i_c) = \frac{ON}{n_0}$ .

$$\sin(i_c) = \frac{0,094}{1} ; \text{ soit : } i_c = 5,4^\circ.$$

### **Exercice 2 : Fibre optique à saut d'indice**

Une fibre optique cylindrique à saut d'indice, d'axe Ox, est constituée d'un milieu transparent homogène et isotrope (appelé cœur), de rayon  $a = 50 \mu\text{m}$ , d'indice optique  $n_1 = 1,50$ , entouré d'un autre milieu transparent homogène et isotrope (appelé gaine) d'indice  $n_2 = 1,47$ . (voir figure I.20)

#### ***Partie I :***

- 1) Ecrire les lois de Descartes aux points O et I.
- 2) Exprimer la valeur minimale de l'angle  $\alpha$  notée  $\alpha_c$ , en fonction de  $n_1$  et  $n_2$  pour qu'il y ait réflexion totale au point I, ( $\alpha \geq \alpha_c$ ). Calculer  $\alpha_c$ .
- 3) En déduire que l'angle  $i$  à l'entrée de la fibre doit rester inférieur à une valeur  $i_{\text{max}}$ , que l'on exprimera en fonction de  $n_1$  et  $n_2$ , pour qu'il y ait réflexion totale au point I. Calculer  $i_{\text{max}}$ .

#### ***Partie II :***

Les rayons lumineux d'inclinaisons différentes n'ont pas le même chemin à parcourir dans la fibre. Donc, leur temps de parcours est variable. Une impulsion lumineuse de courte durée subit dans la fibre un élargissement temporel à sa sortie de celle-ci. Ceci limite rapidement le taux maximal de transfert d'informations à grande distance par ce type de fibre.

- 4) Quel est le type de fibre le mieux utilisé pour diminuer la dispersion intermodale ? Expliquer.

5) Exprimer les chemins optiques  $[L_1]$ ,  $[L_2]$ , et  $[L_3]$  suivis par le rayon lumineux (R) respectivement :

a- entre le point  $O$  et le premier point  $A$  où (R) coupe l'axe  $Ox$  tout en passant par le point I, en fonction de,  $n_1$ ,  $\alpha$  et  $a$ .

b- entre le point  $O$  et la sortie de la fibre de longueur  $L \gg OA$ , tout en passant par le point I, en fonction de  $n_1$ ,  $\alpha$ , et  $L$ . On posera :  $L = m.OA$ .

c- entre le point  $O$  et la sortie de la fibre de longueur  $L \gg OA$ , où le rayon (R) est sur l'axe  $Ox$ , en fonction de  $n_1$  et  $L$ .

6) En déduire l'intervalle de temps  $\Delta t$  entre le temps de parcours minimal et maximal en fonction de  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $c$  et  $L$ .

On donne :  $L = 1 \text{ km}$ ,  $c = 3.10^8 \text{ m/s}$ .

7) Calculer la fréquence maximale (en impulsion/seconde) de signaux lumineux impulsionnels très brefs.

### **Solution**

#### **Partie I :**

1) Les lois de Descartes (voir figure I.20) :

\* Au point O :

- pour la réflexion :  $i = i'$

- pour la réfraction :  $\sin(i) = n_1 \sin(\theta)$

- le rayon incident, le rayon réfléchi, le rayon réfraction et la normale en O à l'interface air-cœur appartiennent à un même plan.

\* Au point I :

- pour la réflexion :  $\alpha = \alpha'$

- pour la réfraction :  $n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\beta)$

- le rayon incident, le rayon réfléchi, le rayon réfraction et la normale en I à l'interface air-cœur appartiennent à un même plan.

2) Pour qu'il y a réflexion totale au point I, il faut que :  $\alpha \geq \alpha_c$ , avec :

$$\sin(\alpha_c) = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \alpha_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

$$\alpha_c = \sin^{-1}\left(\frac{1,47}{1,50}\right). \text{ Soit : } \alpha_c = 78,5^\circ.$$

3) Réflexion totale au point I :  $\alpha \geq \alpha_c = \alpha_{\min}$ .

D'autre part :  $\theta = 90^\circ - \alpha$ , d'où :  $\theta \leq \theta_c = 90^\circ - \alpha_c = \theta_{\max}$ .

De plus,  $\sin(i) = n_1 \sin(\theta)$ .

Par suite :

$$\sin(i) \leq \sin(i_{\max}) = n_1 \sin(\theta_{\max})$$

$$i \leq i_{\max} = \sin^{-1}\left(n_1 \sin(90^\circ - \alpha_c)\right)$$

$$= \sin^{-1}\left(n_1 \sqrt{1 - \sin^2\left(\sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)\right)}\right)$$

$$i \leq i_{\max} = \sin^{-1}\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right)$$

$$i_{\max} = \sin^{-1}\left(\sqrt{(1,50)^2 - (1,47)^2}\right) ; \text{ soit : } i_{\max} = 17,3^\circ.$$

## **Partie II :**

4) Pour diminuer la dispersion intermodale, on peut choisir la fibre monomode qui présente un seul mode de propagation, donc de dispersion modale nulle.

5) a- Le chemin optique  $[L_1]$  s'écrit :

$$[L_1] = n_1 \cdot (OI + IA) = 2n_1 \cdot OI = 2n_1 \cdot \frac{a}{\cos \alpha}.$$

b- Le chemin optique  $[L_2]$  s'écrit :

$$[L_2] = n_1 \cdot (2OI) \cdot m = n_1 \cdot \left(2 \frac{OB}{\sin \alpha}\right) \cdot m = \frac{n_1 L}{\sin \alpha}$$



avec :  $L = m.OA$ .

c- Le chemin optique  $[L_3]$  s'écrit :  $[L_3] = n_1.L$

6) Le temps de parcours minimal est :  $t_{\min} = \frac{[L_3]}{c} = \frac{L}{v} = \frac{L}{c/n_1} = \frac{n_1 L}{c}$ .

où :  $v$  est la vitesse de la lumière dans le cœur.

Le temps de parcours maximal est :

$$t_{\max} = \frac{[L_2]_{\max}}{c} = \frac{L_{2\max}}{v} = \frac{n_1 L}{c \cdot \sin \alpha_c} = \frac{n_1 L}{c \cdot (n_2/n_1)} = \frac{n_1^2 L}{c \cdot n_2}.$$

On note que le parcours est maximal pour  $\alpha = \alpha_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ .

Par conséquent, l'intervalle de temps  $\Delta t$  entre le temps de parcours minimal et maximal est :

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{n_1^2 L}{c \cdot n_2} - \frac{n_1 L}{c} = \frac{n_1 L}{c} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} - 1\right)$$

$$\text{D'où : } \Delta t = \frac{n_1 L \Delta}{c}.$$

$$\Delta t = \frac{1,50 \cdot 1}{3 \cdot 10^5} \cdot \left(\frac{1,50}{1,47} - 1\right). \text{ Soit : } \Delta t = 10^{-7} \text{ s} = 0,1 \mu\text{s}.$$

7) La fréquence maximale est :

$$f_{\max} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{10^{-7}} = 10^7 \text{ impulsions / seconde}.$$

Soit :  $f_{\max} = 10 \text{ Méga-impulsions / seconde}.$

### **Exercice 3 : Fibre optique à gradient d'indice**

A l'aide du logiciel Matlab, représenter le profil d'indice  $n(r)$  d'une fibre à gradient d'indice pour des valeurs de  $\alpha$  égales à 1, 2, 100, en indiquant le type de chaque profil d'indice. On donne :

$a_c = 25 \mu\text{m}$  rayon du cœur,  $n_c(0) = 1,50$  indice du cœur pour  $r = 0$ ,

$a_g = 62,5 \mu m$  rayon de la gaine.  $n_g = 1,47$  indice de la gaine.  
L'indice  $n(r)$  ne présente pas de discontinuité à l'interface cœur-gaine.

### Solution

Le cœur d'une fibre à gradient d'indice est formé d'un grand nombre de couches très minces. L'indice du cœur  $n_c$  décroît du centre jusqu'à l'interface cœur-gaine. Dans la gaine l'indice reste constant.

Le profil d'indice  $n(r)$  d'une fibre à gradient d'indice est donnée par :

$$n_c(r) = n_c(0) \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}, \text{ si } -a \leq r \leq a,$$

$$n_c(r) = n_g, \text{ si } |r| \geq a.$$

$$\text{avec : } \Delta = \frac{n_c^2 - n_g^2}{2n_c^2} = \frac{1,5^2 - 1,47^2}{2 \cdot 1,5^2} = 0,02 : \text{différence relative d'indice.}$$

Le programme sous Matlab suivant donne la représentation du profil d'indice  $n(r)$  d'une fibre à gradient d'indice pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

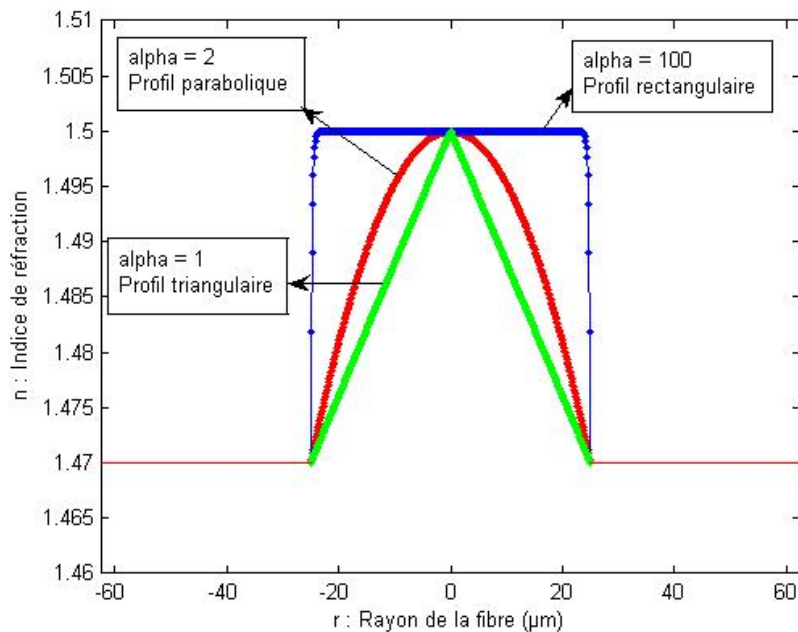
%% Programme sous Matlab: n(r) pour différents valeurs de alpha%%

```
clear all
nc0 = 1.50; %indice du coeur sur l'axe
ng = 1.47; %indice de la gaine
Delta = (nc0^2-ng^2)/(2*nc0^2); % différence relative d'indices
ac = 25*power(10,-6); %rayon du coeur
ag = 62.5*power(10,-6); %rayon de la gaine
alpha = 1; % coefficient de profil
r = -ac:ac/200:ac
rg1 = -ag:ac/200:-ac
rg2 = ac:ac/200:ag
for i = 1:length(r)
    n(i) = nc0*power((1-2*Delta*abs(power((r(i)/ac),alpha))),0.5);
end
```

```

for i = 1:length(rg1)
    ng1(i) = ng;
end
for i = 1:length(rg2)
    ng2(i) = ng;
end
plot(r*power(10,6),n,'g.') % traçage de la courbe
hold on
plot(rg1*power(10,6),ng1,'r')
hold on % traçage dans la même figure
plot(rg2*power(10,6),ng2,'r')
axis([-62.5 62.5 1.46 1.51])

```



**Figure I.21.** Profil d'indice  $n(r)$  d'une fibre à gradient d'indice pour différentes valeurs de  $\alpha$ .

- $\alpha = 1$  : Profil triangulaire,
- $\alpha = 2$  : Profil triangulaire,
- $\alpha = 100$  : Profil triangulaire.

#### Exercice 4

1) Calculer l'atténuation linéique  $A$  en dB/km, d'une fibre optique de 100 m de longueur, si la puissance lumineuse de sortie est égale à 0,3 mW, pour une puissance d'entrée de 2 mW.

2) Calculer le diamètre maximum du cœur  $d_{\max} = 2a_{\max}$ , d'une fibre optique monomode à saut d'indice à la longueur d'onde  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ .

On donne : indice de cœur :  $n_1 = 1,47$ ,  $\Delta = 0,01$ .

#### Solution

1) L'atténuation linéique de la fibre est donnée par :

$$A(\text{dB} / \text{km}) = \frac{P_e(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm})}{L} = \frac{10\log(2) - 10\log(0,3)}{0,1}$$

Soit :  $A(\text{dB} / \text{km}) = 82,4 \text{ dB} / \text{km}$ .

2) Pour que la fibre soit monomode, il faut que :

$$d \leq d_{\max} = 2a_{\max} = \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}} \approx \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \cdot n_1 \sqrt{2\Delta}}$$

$$d_{\max} \approx \frac{2,405 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 1,47 \cdot \sqrt{2 \cdot 10^{-2}}} = 3,68 \cdot 10^{-6} \text{ m} . \text{ Soit : } d_{\max} \approx 3,68 \cdot \mu\text{m} .$$

#### Exercice 5

1) Soit une fibre *multimode* à saut d'indice : indice du cœur  $n_1 = 1,5$ ,  $\Delta = 1\%$ ,  $L = 6 \text{ km}$ .

a- Donner la valeur de l'élargissement impulsionnel due à la dispersion modale de la fibre.

b- Donner la bande passante kilométrique due à la dispersion modale de la fibre.

2) La fibre *multimode* utilisée est une fibre à gradient d'indice optimisé :

$n_1(0) = 1,5$ ;  $\Delta = 1\%$ ,  $L = 6 \text{ km}$ .

- a- Donner la valeur de l'élargissement impulsionnel due à la dispersion modale de la fibre.  
 b- Donner la bande passante kilométrique due à la dispersion modale de la fibre.

### **Solution**

1) a- Pour une fibre à saut d'indice, la dispersion modale (ou bien intermodale) de la fibre est :  $\Delta t_{i.m / \text{saut d'indice}} = \frac{n_c L \Delta}{c}$ .

$$\Delta t_{i.m / \text{saut d'indice}} = \frac{1,5 \cdot (6 \cdot 10^3) \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 10^8} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}.$$

Soit :  $\Delta t_{i.m / \text{saut d'indice}} = 0,3 \mu\text{s}$ .

b- La bande passante de la fibre est :

$$B = \frac{0,5}{\Delta t} = \frac{0,5}{0,3 \cdot 10^{-6}} \approx 1,67 \text{ MHz}.$$

La bande passante kilométrique est égale à :  $B \cdot L = 1,67.6 \text{ MHz.km}$ .

Soit :  $B \cdot L = 10 \text{ MHz.km}$ .

2) a- Pour une fibre à gradient d'indice optimisé, la dispersion modale de la fibre est :

$$\Delta t_{i.m / \text{optimisé}} = \frac{n_c L}{8c} \cdot \Delta^2 = \frac{\Delta}{8} \cdot \Delta t_{i.m / \text{saut d'indice}}.$$

$$\Delta t_{i.m / \text{optimisé}} = \frac{1,5 \cdot 6}{8 \cdot 3 \cdot 10^5} \cdot (0,01)^2 = 0,375 \cdot 10^{-9} \text{ s}.$$

Soit :  $\Delta t_{i.m / \text{optimisé}} = 0,375 \text{ ns}$ .

b- La bande passante kilométrique est égale à :

$$B \cdot L = \frac{0,5}{0,375 \cdot 10^{-9}} \cdot 6 \text{ Hz.km} = 8 \cdot 10^9 \text{ Hz.km}. \text{ Soit : } B \cdot L = 8 \text{ GHz.km}.$$

### **Exercice 6**

Une fibre *multimode* à *saut d'indice* en silice est caractérisée par :  
 $ON = 0,3$  ; indice du cœur  $n_1 = 1,45$  ;  $D_{Chro} = 12,5 \text{ ps / nm.km}$  ;  
 $L = 10 \text{ km}$ .

La source DEL a une largeur spectrale de 50 nm.

-Déterminer la dispersion totale de la fibre et la valeur de sa bande passante kilométrique.

### **Solution**

-La dispersion intermodale est :

$$\Delta t_{i.m} = \frac{n_c L \Delta}{c} = \frac{L(ON)^2}{2c.n_c} = \frac{10.(0,3)^2}{2.3.10^5.1,45} = 1,034.10^{-6} \text{ s}.$$

Soit :  $\Delta t_{i.m} = 1,034 \text{ } \mu\text{s}$ .

-La dispersion chromatique de cette fibre est donnée par :

$$\Delta t_{chr} = D_{chr}.L.\Delta\lambda = 12,5.10.50 \text{ ps} . \text{ Soit : } \Delta t_{chr} = 6,25 \text{ ns} .$$

-La dispersion totale de la fibre est donnée par :

$$\Delta t_{totale} = \sqrt{\Delta t_{i.m}^2 + \Delta t_{chr}^2} = \sqrt{(1,034.10^{-6})^2 + (6,25.10^{-9})^2} .$$

Soit :  $\Delta t_{totale} \approx 1,034 \text{ } \mu\text{s}$ .

-La bande passante kilométrique est égale à :

$$B.L = \frac{0,5}{\Delta t} . L = \frac{0,5}{1,034.10^{-6}} . 10 \approx 4,83.10^6 \text{ Hz.km} .$$

Soit :  $B.L = 4,83 \text{ MHz.km}$ .

### **Exercice 7**

1) Une fibre optique à saut d'indice possède les caractéristiques suivantes : écart relatif des indices  $\Delta = 0,005$  ; indice de réfraction du cœur  $n_c = 1,45$ .

La fibre étant supposée multimode, on demande de calculer la différence des temps de transit  $\Delta\tau_1$  entre les modes les plus lents et les modes les plus rapides (dispersion intermodale).

On donne :  $L = 1 \text{ km}$ .

2) Calculer le diamètre maximum du cœur, pour que la fibre précédente soit monomode pour  $\lambda = 0,850 \mu\text{m}$ .

3) On considère maintenant la dispersion du matériau. Pour  $\lambda = 0,850 \mu m$ , on donne  $\frac{d^2 n}{d\lambda^2} = 3 \cdot 10^{10} m^{-2}$ .

Calculer la dispersion du matériau  $\Delta\tau_2$ , sur une distance de 15 km dans les deux cas suivants :

a- la source lumineuse est une diode électroluminescente pour laquelle  $\Delta\lambda = 50 nm$  ;

b- la source lumineuse est une diode laser avec  $\Delta\lambda = 0,5 nm$ .

4) On suppose maintenant que l'indice de réfraction dans le cœur varie en fonction de la longueur d'onde comme suit :

$$n_c = a\lambda^2, \text{ avec } a = 2 \cdot 10^{-3} \mu m^{-2}.$$

Refaire la question 3) en indiquant la cause de la dispersion chromatique.

### **Solution**

1) La dispersion modale est :

$$\Delta\tau_1 = \frac{n_c L \Delta}{c} = \frac{1,45 \cdot 10,005}{3 \cdot 10^5} = 24,17 \cdot 10^{-9} s.$$

Soit :  $\Delta\tau_1 = 24,17 ns$ .

2) Pour que la fibre soit monomode, il faut que :

$$d \leq d_{\max} = \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \cdot ON} \approx \frac{2,405 \cdot \lambda}{\pi \cdot n_c \sqrt{2\Delta}} \approx \frac{2,405 \cdot 0,85 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 1,45 \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-3}}} = 6,34 \cdot 10^{-6} m.$$

Soit :  $d_{\max} \approx 6,34 \mu m$ .

3) la dispersion du matériau est donnée par :

$$\Delta\tau_2 = D_m \cdot L \cdot \Delta\lambda = -\frac{\lambda}{c} \cdot \left( \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) \cdot L \cdot \Delta\lambda.$$

$$\text{a- Diode DEL : } \Delta\tau_2 = -\frac{0,85 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^8} \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot (15 \cdot 10^3) \cdot 50 \cdot 10^{-9} s.$$

Soit :  $\Delta\tau_2 \approx -63,75 ns$ .

b- Diode laser :  $\Delta\tau_2 = -\frac{0,85.10^{-6}}{3.10^8} \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot (15.10^3) \cdot 0,5.10^{-9}.$

Soit :  $\Delta\tau_2 \approx -0,64 \text{ ns}.$

4) Sachant que  $n_C = a\lambda^2$ , la dispersion du matériau sera donc :

$$\Delta\tau_2 = -\frac{\lambda}{c} \cdot \left( \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) \cdot L \cdot \Delta\lambda = -\frac{\lambda}{c} \cdot 2a \cdot L \cdot \Delta\lambda.$$

a- Diode DEL :  $\Delta\tau_2 = -\frac{0,85.10^{-6}}{3.10^8} \cdot 4 \cdot 10^9 \cdot (15.10^3) \cdot 50.10^{-9} \text{ s}.$

Soit :  $\Delta\tau_2 \approx -8,5 \text{ ns}.$

b- Diode laser :  $\Delta\tau_2 = -\frac{0,85.10^{-6}}{3.10^8} \cdot 4 \cdot 10^9 \cdot (15.10^3) \cdot 0,5.10^{-9}.$

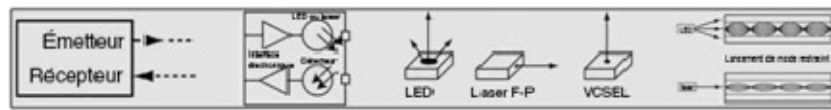
Soit :  $\Delta\tau_2 \approx -0,085 \text{ ns}.$

La cause de la dispersion chromatique est la variation de l'indice de réfraction du cœur en fonction de la longueur d'onde.



## Chapitre 2 : Les Émetteurs et Récepteurs Optiques

## Chapitre 2 : Systèmes et composants de la transmission par fibre optique



Objectifs : Dans ce chapitre, vous devriez apprendre :

Comment fonctionnent les liaisons de données à fibre optique et les systèmes de transmission

Quels composants sont utilisés dans les émetteurs-récepteurs

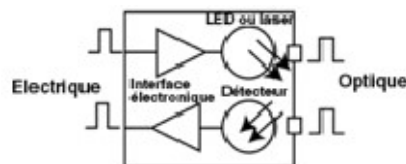
Les types de sources et de détecteurs utilisés dans les émetteurs-récepteurs

Les paramètres de performance des systèmes de transmission à fibres optiques

### I. Liaisons de données à fibre optique



Les systèmes de transmission à fibres optiques utilisent des liaisons de données qui travaillent de manière similaire au schéma ci-dessus. Chaque maillon de fibre se compose d'un émetteur sur une extrémité d'une fibre et d'un récepteur à l'autre extrémité. La plupart des systèmes fonctionnent par transmission dans un sens sur une fibre et dans le sens inverse sur une autre pour un fonctionnement en duplex intégral. Il est possible de transmettre dans les deux sens sur une fibre mais il faut pour cela des coupleurs et la fibre est moins chère que les coupleurs. Les réseaux optiques passifs FTTH (PON) sont parmi les seuls systèmes utilisant la transmission bidirectionnelle sur une seule fibre, car leur architecture de réseau est basée autour de coupleurs.

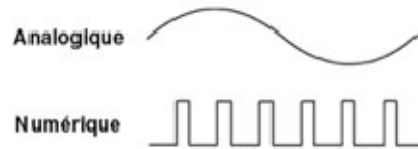


La plupart des systèmes utilisent un « émetteur-récepteur » qui inclut à la fois l'émetteur et le récepteur dans un seul et même module. L'émetteur prend une entrée électrique et la convertit en un signal de sortie optique à partir d'une diode laser ou LED. La lumière provenant de l'émetteur est couplée dans la fibre avec un connecteur et est transmise à travers le réseau de câbles à fibre optique. La lumière provenant de l'extrémité de la fibre est couplée à un récepteur, où un détecteur convertit la lumière en un signal électrique qui est ensuite conditionné de manière appropriée pour son utilisation par l'équipement de réception.

### 1. Analogique ou numérique

Les signaux analogiques sont des signaux à variation continue où l'information contenue dans le signal est contenue dans l'amplitude du signal au cours du temps. Les signaux numériques sont échantillonnés à des intervalles de temps réguliers et l'amplitude est convertie à des octets numériques afin que l'information soit un nombre digital. Les signaux analogiques sont

la forme naturelle de la plupart des données, mais ils sont sujets à une dégradation à cause du bruit dans le système de transmission. A mesure qu'un signal analogique s'affaiblit dans un câble, le rapport signal / bruit devient moins bon, aussi la qualité des signaux se dégrade-t-elle. Les signaux numériques peuvent être transmis sur de longues distances sans dégradation, étant donné que le signal est moins sensible au bruit.



Les liaisons de données à fibres optiques peuvent être de nature soit analogique soit numérique, mais la plupart sont numériques. Les réseaux téléphoniques et informatiques sont numériques, la câblodistribution est actuellement analogique mais est en train d'être convertie au numérique, les systèmes de surveillance par télévision à circuit fermé peuvent être les deux.

Les liaisons analogiques et numériques ont certains paramètres critiques communs et des différences majeures. Pour les deux, la marge de perte optique ou bilan énergétique est ce qu'il y a de plus important. Les liaisons de données analogiques seront testées par rapport au rapport signal / bruit pour déterminer la marge de liaison, tandis que les liaisons numériques utilisent le taux d'erreur binaire comme mesure de la performance. Les deux liaisons nécessitent des tests sur toute la largeur de bande prévue pour le fonctionnement, mais la plupart des liaisons de données sont maintenant prévues pour une application de réseau spécifique, comme la câblodistribution AM ou des moniteurs couleur RVB pour des liaisons analogiques et de réseau optique synchrone (SONET), Ethernet ou canal à fibre pour les liaisons numériques.

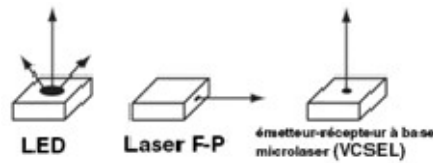
## 2. Conditionnement

Les émetteurs-récepteurs sont généralement emballés dans des paquets standard de l'industrie pour permettre à plusieurs sources d'être logées dans des équipements de transmission. Les modules se connectent à un connecteur duplex sur l'extrémité optique et une interface électrique standard à l'autre bout. Les émetteurs-récepteurs sont alimentés par l'équipement sur lequel ils sont construits.

## II. Sources pour les émetteurs à fibre optique

Les sources utilisées pour les émetteurs de fibres optiques doivent répondre à plusieurs critères : elles doivent être à la longueur d'onde correcte, être capables de moduler suffisamment rapidement pour transmettre des données de manière efficace et être couplées à la fibre.

Quatre types de sources sont couramment utilisés, LED, lasers Fabry-Perot (FP), lasers à rétroaction répartie (DFB) et émetteurs-récepteurs à base microlaser (VCSEL). Tous convertissent les signaux électriques en signaux optiques, mais sont par ailleurs des dispositifs tout à fait différents. Toutes les quatre sont de minuscules dispositifs semi-conducteurs (puces). Les LED et VCSEL sont fabriqués sur des plaquettes semi-conductrices de telle sorte qu'ils émettent de la lumière à partir de la surface de la puce, tandis que les lasers DFB et PF émettent du côté de la puce, à partir d'une cavité laser créée au milieu de la puce.



Les LED ont des puissances beaucoup plus faibles que les lasers et leurs modèles de lumière en sortie, plus grands et divergents, les rendent plus difficiles à coupler aux fibres, ce qui les limite à un usage en fibres multimodes. Les lasers ont des sorties de lumière plus petites et plus resserrées et sont faciles à coupler à des fibres monomodes, ce qui les rend idéaux pour les liaisons longue distance à haute vitesse. Les LED ont beaucoup moins de bande passante que les lasers et sont limitées aux systèmes d'exploitation à environ 250 MHz ou à 200 Mb/s. Les lasers ont une capacité de bande passante très élevée, la plupart d'entre eux étant utile à des valeurs bien supérieures à 10 GHz ou 10 Gb/s.

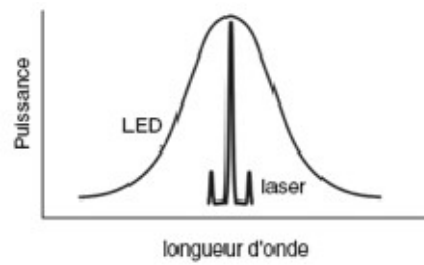
En raison de leur procédé de fabrication, les LED et VCSEL ne sont pas chers à fabriquer. Les lasers sont plus chers parce que la création de la cavité laser à l'intérieur du dispositif est plus difficile, la puce doit être séparée de la plaquette de semi-conducteur et à chaque extrémité doit être revêtue avant que le laser puisse être finalement testé pour voir s'il fonctionne.

#### Spécifications de sources typiques pour fibres optiques

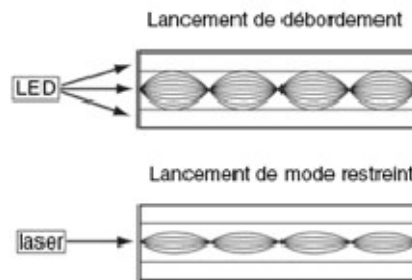
Type de périphérique longueurs d'onde (nm) Puissance en

Type d'appareil	Longueur d'onde (nm)	Puissance dans la fibre (dBm)	Bande passante	Types de fibre
LED	850, 1300	-30 à -10	<250 MHz	MM
Laser Fabry-Perot	850, 1310 (1280-1330), 1550 (1480-1650)	0 à +10	>10 GHz	MM, SM
Laser DFB	1550 (1480-1650)	0 à +13 (+25 avec amplificateur à fibre)	>10 GHz	SM
VCSEL	850	-10 à 0	>10 GHz	MM

Les LED ont une bande passante limitée, tandis que tous les types de lasers sont très rapides. Une autre grande différence entre les LED et les deux types de lasers est la sortie spectrale. Les LED ont un très large spectre de sortie qui les fait souffrir de dispersion chromatique dans la fibre, alors que les lasers ont une sortie spectrale étroite qui souffre très peu de dispersion chromatique. Les lasers DFB, qui sont utilisés dans les systèmes DWDM et longue distance, ont la largeur spectrale la plus étroite, ce qui minimise la dispersion chromatique sur les liaisons les plus longues. Les lasers DFB sont également très linéaires (c'est-à-dire que la sortie de lumière suit directement l'entrée électrique), de sorte qu'ils peuvent être utilisés en tant que sources dans les systèmes de télévision par câble AM.



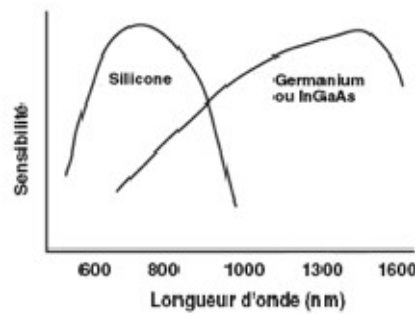
Le choix entre ces dispositifs est déterminé principalement par des questions de vitesse et de compatibilité de la fibre. Comme de nombreux systèmes locaux utilisant de la fibre multimode ont dépassé des débits de 1 Gb/s, les lasers (pour la plupart VCSEL) ont remplacé les LED. La sortie de la LED est très large mais les lasers sont très concentrés, et les sources auront un remplissage modal très différent dans les fibres. Le lancement restreint du VCSEL ou de n'importe quel laser rend la largeur de bande effective de la fibre plus élevée, mais la fibre optimisée pour le laser, habituellement OM3, est le choix qui s'impose pour les lasers.



L'électronique d'un émetteur est simple. Ils permettent de convertir une impulsion d'entrée (voltage) en une impulsion de courant précis pour conduire la source. Les lasers sont généralement pondérés à un courant continu bas et modulés au-dessus de ce courant pondéré pour maximiser la vitesse.

### III. Détecteurs pour récepteurs à fibres optiques

Les récepteurs utilisent des détecteurs à semi-conducteurs (photodiodes ou photodétecteurs) pour convertir les signaux optiques en signaux électriques. Les photodiodes de silicium sont utilisées pour les liaisons de courtes longueurs d'onde (650 pour FOP et 850 pour la fibre de verre MM). Les systèmes de longues longueurs d'onde utilisent généralement des détecteurs InGaAs (arséniure de gallium indium) car ils ont moins de bruit que le germanium, ce qui permet des récepteurs plus sensibles.



Les systèmes à très grande vitesse utilisent parfois des photodiodes à avalanche (APD) qui ont une capacité de bande passante plus élevée que les autres photodiodes. Les APD sont pondérées à haute tension pour créer du gain dans la photodiode, ce qui augmente la sensibilité et la capacité de fréquence. Ces appareils sont plus coûteux et plus compliqués à utiliser, mais offrent des gains de performances.

#### IV. Composants de transmission à fibres optiques spéciaux

##### 1. Multiplexage en longueur d'onde

Etant donné que la lumière de différentes longueurs d'onde ne se mélange pas à l'intérieur de la fibre, il est possible de transmettre des signaux à plusieurs longueurs d'onde différentes sur une seule fibre, et ce simultanément. Si la fibre elle-même est peu coûteuse, l'installation de nouveaux câbles peut être onéreuse, donc l'utilisation de fibres installées pour transporter des signaux supplémentaires peut être très rentable.

Le multiplexage en longueur d'onde (WDM) a été utilisé pour la première avec la fibre multimode dans les premiers temps de la fibre optique, en utilisant à la fois du 850 et du 1310 nm sur une fibre multimode. Actuellement, les réseaux monomodes peuvent transporter des signaux à 10 Gb/s sur 64 longueurs d'onde ou plus, ce qui est appelé Multiplexage en longueur d'onde dense (DWDM). Les systèmes multimodes par WDM ont eu moins de popularité, mais certaines normes utilisent le WDM pour transporter des signaux multiples à plus de 1 Gb/s sur de la fibre multimode optimisée pour le laser.

##### 2. Répéteurs et amplificateurs à fibre

Même s'il est vrai que la faible perte de la fibre optique permet aux signaux de voyager des centaines de kilomètres, des lignes extrêmement longues et les câbles sous-marins requièrent des régénérateurs ou répéteurs pour amplifier périodiquement le signal. Au début, les répéteurs étaient essentiellement composés d'un récepteur suivi d'un émetteur. Le signal d'entrée était converti d'un signal lumineux à un signal électrique par un récepteur, nettoyé pour enlever autant de bruit que possible, puis retransmis par un autre émetteur laser. Ces répéteurs ajoutaient du bruit au signal, consommaient beaucoup de puissance et étaient compliqués, raisons pour lesquelles ils étaient une source de problèmes. Ils devaient également être faits pour un débit de transmission spécifique et la mise à niveau rendait nécessaire le remplacement de tous les répéteurs : une tâche vraiment difficile pour un câble sous-marin !

La solution pour les répéteurs de fibre optique est l'amplificateur à fibre. L'amplificateur à fibre typique fonctionne dans la bande de 1480 à 1650 nm. Il se compose d'une longueur de fibre dopée à l'erbium pompée par un laser à 980 ou 1480 nm. Le laser à pompe fournit

l'énergie pour l'amplificateur, tandis que le signal entrant stimule l'émission de l'impulsion lorsqu'il passe à travers la fibre dopée. L'émission stimulée stimule plus d'émission, il y a donc une croissance rapide et exponentielle de la puissance optique dans la fibre dopée. Des gains de  $> 40$  dB ( $10'000$  X) sont possibles avec des puissances de sortie de  $> +26$  dBm (400 mW).

En plus d'être utilisés en tant que répéteurs, les amplificateurs à fibre sont utilisés pour augmenter le niveau du signal pour les systèmes de télévision par câble, qui exigent des niveaux de puissance élevés au niveau du récepteur pour maintenir le signal adéquat en fonction de la performance de bruit, ce qui permet de plus longues longueurs de câble ou, en utilisant des diviseurs, de « diffuser » un signal unique, à travers un coupleur, vers de nombreuses fibres, ce qui permet d'économiser le coût d'émetteurs supplémentaires. Dans la téléphonie, les amplificateurs à fibre sont combinés avec les DWDM (multiplexages en longueur d'onde dense) pour surmonter les inefficiences de coupleurs DWDM pour la transmission longue distance.

### **3. Performance de liaison de donnée et bilan énergétique de liaison**

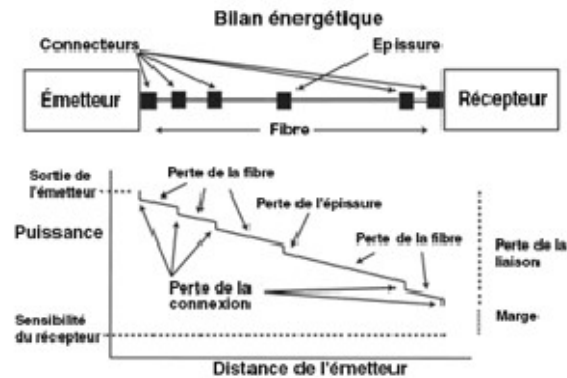
Mesurer la qualité de la transmission de données

Tout comme avec le fil de cuivre ou la transmission radio, la performance de la liaison de données avec la fibre optique peut être déterminée par la façon dont celle-ci transmet des données ; dans quelle mesure le signal électrique reconverti sur le récepteur correspond à l'entrée de l'émetteur.

La capacité d'un système à fibres optiques pour transmettre des données dépend en définitive de la puissance optique au niveau du récepteur, comme indiqué ci-dessus, où l'on peut voir le taux d'erreur binaire dans la liaison de données en fonction de la puissance optique au niveau du récepteur. (BER, le taux d'erreur binaire, est l'inverse de rapport signal-sur-bruit, par exemple un haut BER signifie un pauvre rapport signal sur bruit.) Trop ou trop peu de puissance entraînera des taux d'erreur binaire élevés. Trop de puissance et l'amplificateur de réception sature, trop peu et le bruit devient un problème car il interfère avec le signal. La puissance du récepteur dépend de deux facteurs fondamentaux : combien de puissance est envoyée dans la fibre par l'émetteur et combien est perdue par l'affaiblissement dans l'installation de câbles de fibre optique qui relie l'émetteur au récepteur.

### **4. Bilan énergétique de la liaison**

Le bilan énergétique optique de la liaison est déterminé par deux facteurs, la sensibilité du récepteur, qui est déterminée dans la courbe de taux d'erreur binaire ci-dessus, et la puissance de sortie de l'émetteur dans la fibre. Le niveau de puissance minimum qui produit un taux d'erreur binaire acceptable détermine la sensibilité du récepteur. La puissance de l'émetteur couplée dans la fibre optique détermine la puissance transmise. La différence entre ces deux niveaux de puissance détermine la marge de perte (bilan énergétique) de la liaison.



Les liaisons à haut débit comme les LAN Ethernet d'1 ou 10 Gigabit sur fibre multimode ont des facteurs de déclassement pour la bande passante de la fibre causée par la dispersion qui étale les impulsions des données numériques. Les anciennes fibres OM1 62,5/125 ne fonctionnent généralement que sur des liaisons plus courtes alors que les liaisons sur fibre OM3 50/125 optimisée pour laser permettent de travailler sur de plus longues distances. Même les liaisons interurbaines sur fibre monomode peuvent présenter des restrictions causées par la dispersion chromatique ou modale de polarisation.

Si la liaison est conçue pour fonctionner à différentes vitesses de transmission, il est nécessaire de générer une courbe de performance pour chaque débit binaire. Puisque la puissance totale du signal est fonction de la largeur d'impulsion et que la largeur d'impulsion varie selon le débit binaire (les débits binaires plus élevés impliquent des impulsions plus courtes), la sensibilité du récepteur se dégrade aux débits binaires plus élevés.

Tous les fabricants de composants et de systèmes de liaisons de données spécifient la sensibilité de récepteur de leurs liaisons (cela peut être une puissance minimale requise) et la puissance minimum couplée dans la fibre depuis la source. Les valeurs typiques de ces paramètres sont indiquées dans le tableau ci-dessous. Pour pouvoir les tester correctement, un fabricant ou un concepteur de système doit connaître les conditions d'essai. Pour les composants de liaison de données, ceci comprend la fréquence d'entrée de données ou le taux binaire et le rapport cyclique, les tensions d'alimentation et le type de fibre couplée à la source. Pour les systèmes, ce sera le logiciel de diagnostic que requiert le système.



Paramètres de performance liaison/système typiques de la fibre optique

Type de liaison	Fibre	Type de source/fibre	Longueur d'onde (nm)	Puissance de transmission (dBm)	Sensibilité du récepteur (dBm)	Marge de la liaison (dB)
Télécom	SM	Laser	1310/1550	+3 to -6	-30 à -45	30 à 40
	SM	DWDM	1550	+20 à 0	-30 à -45	40 à 50
Données	MM	LED/VCSEL	850	-3 à -15	-15 à -30	3 à 25
	MM ou SM	Laser	1310	-0 à -20	-15 à -30	10 à 25
Câblodistribution (AM)	SM	Laser	1310/1550	+10 à 0	0 à -10	10 à 20

Parmi les connexions et réseaux de communications de données, il y a beaucoup de systèmes à fibres optiques spécifiques au fournisseur, mais il y a aussi un certain nombre de réseaux standards à cette industrie, tels qu'Ethernet, qui ont des versions spécifiques pour la fibre.

## Fibre Optique. Composants, interfaces et couplages

### 1. Sources d'émission

La lumière est injectée vers un diamètre de fibre relativement petit ( $D < 500 \mu\text{m}$ ). Seule la lumière contenue dans le cône d'admission se propagera dans la fibre.

Elle doit avoir une longueur d'onde située dans les fenêtres d'atténuation minimale :

$$\{0,8-0,9 \mu\text{m}\} ; \{1,1-1,3 \mu\text{m}\} ; \{1,55 \mu\text{m}\}$$

La source de rayonnement doit satisfaire à certaines contraintes :

- surface restreinte ;
- directions compatibles avec le cône d'admission de la fibre ;
- longueurs d'onde pour lesquelles les fibres présentent la meilleure transparence ;
- largeur spectrale faible et grande intensité ;
- temps de réponse rapide et facilité de modulation ;
- fiabilité et économie.

#### 1.1. Diode électroluminescente (DEL)

La diode électroluminescente n'émet qu'une faible intensité et la pureté spectrale est médiocre. D'où un usage limité aux liaisons à courte distance.

Longueur d'onde centrale du spectre d'émission spontanée :

$$\lambda_g = \frac{1,24}{E_g} \quad [1]$$

- $E_g$ : largeur de bande interdite (en eV)  
Ce spectre, approximativement gaussien de largeur typique ( $\Delta\lambda=50-60\text{nm}$ ), peut être étendu grâce à la présence de dopants ou d'impuretés.

Dans les semi-conducteurs utilisés :

$$E_g \in \{0,36 \text{ eV} - 2,2 \text{ eV}\} \Rightarrow \lambda_g \in \{0,56 \mu\text{m} - 3,6 \mu\text{m}\}$$

Les diodes émettant en lumière visible sont généralement des diodes à homojonction, mais de rendement médiocre et de coût très faible.

L'hétérojonction permet d'améliorer le rendement quantique et la rapidité de modulation. Les recombinaisons sont confinées dans une couche active de très faible épaisseur entre deux couches de confinement de largeur de bande interdite plus élevée : bonne transparence aux photons émis (amélioration du rendement externe) et indice de réfraction plus faible.

Une double hétérojonction permet d'obtenir un bon rendement.

La bande passante reste limitée (30 MHz – 100 MHz) à cause du temps de transit des porteurs. La technique d'émission *par la tranche* permet d'atteindre 200 MHz.

## 1.2. Diode laser (DL)

La diode laser émet une lumière de plus grande pureté, quasiment monochromatique. Elle est apte aux liaisons longue distance. Son prix est élevé.

La diode laser réalise à l'état solide, dans un volume restreint et sous une faible tension de commande, les fonctions d'amplification de lumière et de cavité résonante qui caractérisent le laser et qui permettent donc une émission cohérente (régime d'émission stimulée).

D'où une amplification de la lumière suivant l'axe Oz:

$$P(z) = P_0 \exp(gz) \text{ avec } g = \alpha - \frac{\ln R}{L} \quad [2]$$

- g: coefficient de gain
- $\alpha$ : coefficient d'absorption
- R: coefficient de réflexion sur les deux faces
- L: longueur de la cavité

La couche active, cavité résonnante Fabry-Perot, se comporte en guide diélectrique plan, grâce à son indice plus élevé et à la réflexion partielle sur les deux faces clivées du laser.

Le coefficient de réflexion R est assez important (environ 0,3) en raison de la forte valeur d'indice du matériau ( $n \approx 3,5$ ) :

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad [3]$$

Le spectre d'émission présente un certain nombre de raies correspondant aux fréquences de résonance de la cavité  $\nu_p$ :

$$\lambda_p = \frac{c}{\nu_p} = \frac{2nL}{p} \quad ; p \text{ entier (de l'ordre du mode)} \quad [4]$$

Ces raies sont espacées de :

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2NL} \quad ; N \approx n \text{ (indice de groupe)} \quad [5]$$

Le diagramme d'émission dépend des dimensions de la région émissive. Le guide d'onde qui constitue la cavité est suffisamment étroit pour être monomode. Le faisceau émis est relativement gaussien.

Les principales structures de diode laser (mode de guidage latéral) sont :

- les structures à guidage par gain ;
- les structures à guidage par indice ;
- les structures à puits quantiques ;
- les structures à contre réaction distribuée ou DFB (Distributed Feed-Back).

## 2. Composants de réception

Les exigences attendues du détecteur sont sensibilité, bande passante et bruit qu'il introduit :

- capacité de délivrer un signal électrique utilisable même si le flux énergétique reçu est faible et varie rapidement dans le temps afin de transporter un maximum d'information ;
- rapidité pour transformer ce flux énergétique sans en déformer les variations dans le temps ;
- dimensions compatibles avec celles de la fibre pour un couplage efficace avec la lumière.

Il existe deux catégories de détecteur de rayonnement : thermiques et quantiques. Les premiers sont inutilisables en télécommunications (faible sensibilité et rapidité très insuffisante).

Dans les détecteurs quantiques, il y a transfert d'énergie du photon à l'électron d'un solide (effet photoélectrique). Le vide étant nécessaire pour récupérer l'électron émis, les dimensions de ce type de détecteur ne sont pas directement adaptables à celles de la fibre.

Photodiodes (PIN et PDA) et phototransistors sont les photo-détecteurs à semi-conducteur utilisés en télécommunications optiques.

### 2.1. Photodiodes

Le temps de réponse de la photodiode PIN est limité par la capacité de jonction et par le temps de transit. Il peut être réduit en élargissant la zone d'absorption des photons.

Un bon compromis est de prendre une épaisseur de la zone intrinsèque voisine de la profondeur d'absorption. Une autre possibilité est d'augmenter la tension de polarisation inverse.

Ces photodiodes ont un rendement de conversion maximale et une bande passante élevée.

Le signal reçu étant souvent très faible, le photocourant doit être amplifié, mais le bruit du préamplificateur placé après la photodiode est souvent prépondérant. On utilise alors un composant à gain interne, la *photodiode à avalanche* (PDA) dont le principe est l'ionisation en chaîne, sous l'effet d'un champ électrique intense.

Les photodiodes à avalanche sont utilisées pour la transmission à 1,3 et 1,5  $\mu\text{m}$ . Elles sont réalisées avec les mêmes matériaux semi-conducteurs que ceux des diodes laser. Les paramètres importants qui la caractérisent sont :

- la tension de claquage ;
- le coefficient de multiplication ;
- les coefficients d'ionisation ;
- le courant d'obscurité ;
- la rapidité.

## 2.2. Phototransistors

Le phototransistor est un transistor dont la base est éclairée. La jonction collecteur – base, polarisée en inverse, joue le rôle de photodiode et le photocourant est amplifié par le gain en courant du transistor (typiquement 30 à 100).

Le phototransistor est un composant à gain interne. Il est plus simple et plus fiable que la PDA, car la tension de polarisation n'est pas nécessairement élevée.

Dans le phototransistor silicium, la base doit être relativement épaisse à cause de la grande profondeur d'absorption du matériau. Le gain et la fréquence de transition sont alors peu élevés, mais l'avantage reste le faible coût.

Les phototransistors en semi-conducteurs III-V, sensibles jusqu'à 1600 nm, autorisent un gain de l'ordre de 100 à 150, et une fréquence de transition de l'ordre de 1 à 2 GHz.

## 3. Interfaces et couplages

### 3.1. Couplage émetteur – fibre

Les sources doivent être aussi petites que le cœur de la fibre. Appliquer directement la surface de la fibre sur la surface de la source, axes alignés, est la meilleure façon d'injecter le maximum de lumière. En réalité, il existe un interstice qui ne doit pas dépasser 2 à 4 fois le diamètre du cœur.

La source émet de la lumière dans un angle solide  $\Omega$ . Si le spot lumineux a une surface  $A_s$  supérieure à la surface  $A_f$  du cœur de la fibre, une partie de la lumière est perdue. En supposant un rayonnement uniforme de la source dans l'angle solide  $\Omega$ , la perte de couplage est (en décibel) :

$$D_s = 10 \ln \frac{A_f}{A_s} \quad \text{pour } A_s \succ A_f$$
$$D_s = 0 \quad \text{pour } A_s \prec A_f$$

Pour évaluer le couplage entre une source de lumière et une fibre optique, il faut connaître le diagramme de rayonnement de la source et l'ouverture numérique de la fibre.

En général, le demi-angle du cône d'admission a une valeur de 10 à 14°. Le demi-angle d'ouverture à 3 dB des diagrammes de rayonnement varie de 15 à 60°.

Toute la lumière émise sous des angles supérieurs à 10° (ou 14°) est une perte au couplage de la fibre, l'idéal étant le rayonnement compatible avec le cône d'admission de la fibre.

L'intensité d'une source dans la direction d'angle  $i_0$  peut s'écrire :

$$I = I_0 \cos^m(i_0) ; m \geq 1$$

- $i_0$ : intensité dans la direction de la normale
- $m$ : coefficient caractéristique de la source ( $m=1$  source lambertienne)

Par définition :

$$I(i_0) = \frac{dP}{d\Omega}$$

- $d\Omega$ : angle solide élémentaire dans la direction  $i_0$
- $P$ : puissance de la lumière émise

Par intégration, on obtient :

- $P_T$ : puissance totale  $[0 - \pi/2]$
- $P_c$ : puissance de la lumière dans le cône d'admission  $[0 - i_{OM}]$

La perte au couplage  $D_{ON}$  (dB) a pour expression :

$$D_{ON} = 10 \log \frac{P_c}{P_T} = 10 \log \frac{(1 - \cos^{m+1} i_{OM})g}{g+2} [9]$$

Pour une fibre à saut d'indice ( $g \rightarrow \infty$ )

$$D_{ON} = 10 \log \frac{P_c}{P_T} = 10 \log (1 - \cos^{m+1} i_{OM}) [10]$$

La perte supplémentaire apportée par une fibre à gradient d'indice ( $g \approx 2$ ) est égale à  $10 \log(0,5) = -3$  dB.

Pour pénétrer dans la fibre, la lumière doit franchir l'interface air – cœur ( $n_0 / n_1$ ). Du fait de cette différence d'indices, une partie du flux énergétique est réfléchi (perte de Fresnel). Le facteur de réflexion est égal à :

$$R = \left( \frac{n - n_0}{n + n_0} \right)^2 [11]$$

La perte de Fresnel a pour expression :

$$D_R = 10 \log(1 - R) [12]$$

Elle peut être réduite en interposant une couche antireflet ou une résine adaptatrice des indices de réfraction.

La perte totale au couplage est donc :

$$D_T = D_s + D_{ON} + D_R [13]$$

### 3.2. Couplage fibre–récepteur

L'interface optique de réception comprend la photodiode, des circuits de polarisation et le préamplificateur à minimum de bruit et de distorsion aux signaux. Pour cela, on intègre la photodiode et le préamplificateur dans le même boîtier.

#### Première solution

On raccorde à la fibre optique par une fibre amorce ou sous la forme d'une embase active.

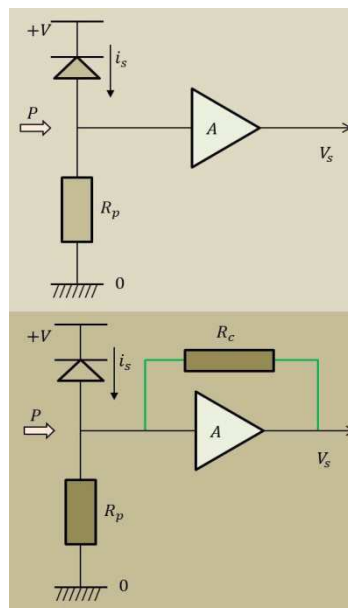
Cette solution est adoptée pour les liaisons à haut débit. Le diamètre de la fibre amorce est supérieur à celui des fibres du câble, afin d'éviter les pertes au raccordement.

### Deuxième solution

La photodiode est logée dans l'embase d'un connecteur sur lequel le câble est raccordé. Le coefficient de couplage fibre-détecteur est moins bon que le précédent.

Les préamplificateurs sont des amplificateurs à haute impédance d'entrée ou amplificateurs transimpédance.

Les amplificateurs à haute impédance d'entrée (a) sont réalisées sans contre-réaction, avec un amplificateur opérationnel (jusqu'à quelques mégahertz) ou un transistor à effet de champ (au-delà).



Si la résistance de polarisation  $R_p$  est forte, les amplificateurs sont très sensibles et de très faible bruit.

Pour compenser la constante de temps  $\tau = RC$  (intégration du signal au-delà de la fréquence de coupure), l'amplificateur doit être suivi d'un égaliseur dont la réalisation est délicate, car  $\tau$  est peu reproductible.

Les amplificateurs transimpédance (b) ont une contre-réaction  $R_c$ .

Si le gain de la chaîne amplificatrice  $A$  est grand, on a

$$V_s \approx -R_c i_s \quad [14]$$

donc un gain plat et reproductible sur une large bande passante. L'inconvénient étant que la résistance apporte un supplément de bruit.

En dessous d'une fréquence de l'ordre de 50 MHz, la structure à haute impédance est moins bruyante. Au-delà, on utilise une structure transimpédance à transistors bipolaires, moins bruyant et de très large bande passante.

Au-delà de 0,5 GHz environ, des problèmes de stabilité se posent et on doit utiliser des transistors à effet de champ GaAs ou InP, intégrés si possible avec la photodiode.



## BIBLIOGRAPHIE

1. Gérard HINCELIN, « ELE107– Polycopié de Télécommunications optiques », CNAM Paris, 2004.
2. Zeno TOFFANO, « Optoélectronique - Composants photoniques et fibres optiques », Ellipses, 2001.
3. Emmanuel ROSENCHER, « Optoélectronique », Dunod, 2002.
4. [http://www.optiqueingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M05\\_C04/c\\_Contentu.html](http://www.optiqueingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M05_C04/c_Contentu.html)
5. Pierre LECOY, « Télécoms sur fibres optiques », Hermès - Lavoisier, 2007.
6. Jérôme LAURENT, « Communications optiques à très haut débit », EXAMEN PROBATOIRE, CNAM Paris, 2004.
7. <http://www.bibsciences.org/bibsup/j3ea/full/print.php?vol=vol2&art=7&img=bg>
8. Michel JOINDOT et Irène JOINDOT, « Les télécommunications par fibres optiques », Dunod, Paris, 1996.
9. Hwei HSU, « Signaux et Communications », EdiScience, Dunod 2004.