

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE *MUSTAPHA STAMBOULI* DE MASCARA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



# **Polycopié de Cours Optoélectronique**

*Réalisé par :*

**Dr. Bentahar Attaouia**

Ce cours est destiné aux étudiants de 3<sup>ème</sup> année

Licence en Télécommunications

Algérie

2021

## Avant Propos

L'optoélectronique est à la fois une branche de l'électronique et de la photonique. Elle concerne l'étude des composants électroniques qui émettent ou interagissent avec la lumière. Elle peut concerner aussi la conception de composant optique, tel que les guides optiques, grâce à la microélectronique, on parle alors le plus souvent d'optique intégrée.

Les composants optoélectroniques sont des transducteurs électronique vers optique, optique vers électrique, ou bien des composants qui utilisent de tels systèmes pour fonctionner.

L'optoélectronique est déjà présente dans de nombreuses technologies. Systèmes optiques de transport de l'information avec les fibres de verre et fibres monocristallines, amplificateurs optiques, systèmes d'affichage et visualisation, etc., font partie pour beaucoup de la vie quotidienne. De nouvelles applications sont aussi à l'étude, comme les boîtes quantiques dopées aux terres rares pour la production de lumière. Cette base documentaire s'adresse à tout ingénieur désirant mettre à profit les apports de l'optoélectronique dans ses réalisations. Elle lui fournit une boîte à outils des composants disponibles et des perspectives sur ceux de demain

Le présent manuscrit est un support du cours d'optoélectronique conçu spécialement pour guider les étudiants dans l'apprentissage des principes de fonctionnement des systèmes optiques. Le contenu de ce cours s'adresse plus particulièrement aux étudiants de 3<sup>ème</sup> année en licence télécommunication, il est adapté avec le programme du canevas et présenté avec un style très simple qui permet aux étudiants une compréhension très rapide. L'objectif de ce polycopie est avant tout la maîtrise des concepts de base de l'optique et de l'interaction lumière-matière. Il permet par la suite au étudiants d'acquérir des connaissances sur les composants optoélectroniques les plus répandus et leurs utilisations.

Il est présenté comme suit :

- ◆ Le premier chapitre se divise en deux parties dont la première décrit les différents types de la fibre optique et le principe de fonctionnement tandis que la deuxième partie de ce chapitre se concentre sur les câbles optiques, leurs applications et cite les types des connecteurs utilisés pour le raccord des fibres optiques.
- ◆ Le deuxième et le troisième chapitres fournissent les base théoriques sur la physique des semi-conducteurs surtout les principes d'interactions matière-lumière et couvrent les questions liées à la conception et l'application des émetteurs, des récepteurs et des amplificateurs de la lumière.
- ◆ Le dernier chapitre donne un schéma synoptique sur une liaison optique et décrit son principe de fonctionnement, son bilan optique et les critères d'évaluation de cette dernière.

# Sommaire

## Avant propos

### Chapitre 1 : La fibre et les différents types de câbles optiques

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b> .....	2
<b>1.2</b>	<b>Fibre optique</b> .....	2
1.2.1	Composition .....	2
1.2.2	Intérêts des fibres optiques .....	2
1.2.3	Indice de réfraction .....	3
1.2.4	Loi de Descartes .....	3
1.2.5	Principe de guidage de la lumière .....	4
1.2.6	Angle d'acceptance et ouverture numérique .....	4
1.2.7	Mode de propagation .....	4
1.2.8	Fibres optiques monomodes .....	5
1.2.9	Fibres optiques multimodes .....	6
1.2.10	Limitations de la propagation dans une fibre optique .....	6
<b>1.3</b>	<b>Les câbles optiques</b> .....	9
1.3.1	Fabrication de la fibre optique en silice .....	9
1.3.2	Câble à fibre optique .....	11
1.3.3	Câble sous marin .....	13
1.3.4	Connections optiques .....	14
1.3.5	Raccordement optiques .....	15
1.3.6	Problèmes liés au raccordement des fibres optiques .....	17
<b>1.4</b>	<b>Conclusion</b> .....	19

### Chapitre 2 : Les émetteurs et les récepteurs de la lumière

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b> .....	20
<b>2.2</b>	<b>Emetteur de la lumière</b> .....	20
2.2.1	Diode électroluminescente (DEL) .....	21
2.2.2	Diodes laser (DL) .....	25
<b>2.3</b>	<b>Récepteur de la lumière</b> .....	28
2.3.1	Photodiode PIN .....	28
2.3.2	Photodiode à avalanche (APD : Avalanche Photodiode Detectors) .....	29
2.3.3	Comparaison entre la photodiode PIN et la photodiode APD .....	30
2.3.4	Caracteristiques de la photodiode .....	30
<b>2.4</b>	<b>Conclusion</b> .....	31



## Chapitre 3 : Amplificateur à fibre dopée à l'erbium EDFA

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Intéret de l'amplification optique</b> .....	32
<b>3.3</b>	<b>Principe physique de l'amplification optique</b> .....	33
<b>3.4</b>	<b>Amplificateur à fibre dopée à l'erbium</b> .....	33
3.4.1	Intéret de l'erbium .....	33
3.4.2	Structure de l'EDFA .....	34
3.4.3	Principe de fonctionnement de l'EDFA.....	35
3.4.4	Configurations de pompage de l'EDFA.....	36
3.4.5	Caracterisation de l'EDFA.....	36
3.4.6	Application de l'EDFA.....	39
3.4.7	Performances de l'EDFA.....	41
<b>3.5</b>	<b>Amplificateur optique à semi conducteur</b> .....	41
<b>3.6</b>	<b>Conclusion</b> .....	42

## Chapitre 4 : Principe d'une liaison par fibre optique

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b> .....	43
<b>4.2</b>	<b>Principe d'une liaison à fibre optique</b> .....	43
4.2.1	Emetteur optique .....	44
4.2.2	Modulateurs .....	44
4.2.3	Récepteur optique. ....	45
<b>4.3</b>	<b>Critères d'évaluation d'une liaison à fibre optique</b> . ....	45
4.3.1	Diagremme de l'oeil .....	46
4.3.2	Taux d'erreur binaire .....	47
4.3.2	Facteur de qualité Q.....	47
<b>4.4</b>	<b>Bilan d'un système de transmission optique</b> .....	48
4.4.1	Affaiblissement globale de la propagation.....	49
4.4.2	Pertes totales dans un canal de transmission .....	49
<b>4.5</b>	<b>Principe de mesure avec un OTDR</b> .....	49
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b> .....	51
<b>Références</b> .....		<b>52</b>

# Chapitre 1

## La fibre et les différents types de câbles optiques

# Chapitre 1 La fibre et les différents types de câbles optiques

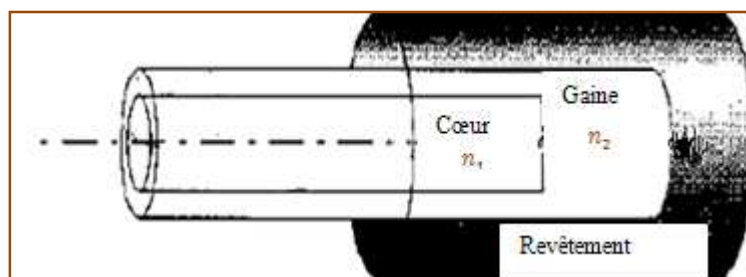
## 1.1 Introduction :

Comparée aux divers supports de transmission, la fibre optique offre un support physique à grande fiabilité, quasiment insensible aux bruits électromagnétiques et offre ainsi l'avantage de bandes passantes énormes pour la transmission à haut débit, il semble bien que les télécommunications aient trouvé là un support de transmission idéal. Dans ce chapitre nous allons présenter la fibre optique, en basant sur deux grandes parties ; la première consiste à étudier les notions de guidage, les différents types de la fibre optique (multi modes et monomodes) et les facteurs qui limitent la capacité d'une transmission optique en termes de débit et de distance et qui dépendent de la fibre optique elle-même tels que l'atténuation et la dispersion. La seconde présente une étude détaillée concernant les divers types de câbles optiques et leurs applications.

## 1.2 Fibre optique :

### 1.2.1 *Composition*

Une fibre optique est un cylindre de matériaux diélectrique transparent, elle est constituée d'un cœur d'indice de réfraction  $n_1$ , entourée par la gaine optique d'indice de réfraction  $n_2$  plus faible. Ces deux régions essentielles pour le guidage de la lumière sont réalisées avec deux matériaux différents [1]. La fibre optique est souvent recouverte d'une gaine dite mécanique est rajoutée pour protéger la fibre optique en assurant une meilleure résistance mécanique.



**Figure 1.1** : la structure d'une fibre optique.

### 1.2.2 *Intérêts des fibres optiques:*

Les principales caractéristiques qui ont assuré le développement de la fibre optique et qui en ont fait le support privilégié pour les liaisons grandes distances et hauts débits sont :

- ♦ Une bande passante très large, ce qui autorise des débits de transmission très élevés;

- ◆ Une faible atténuation, ce qui autorise des liaisons à grande distance;
- ◆ Une insensibilité aux perturbations électromagnétiques, ce qui garantit une diaphonie nulle et une grande sécurité;
- ◆ Un poids et des dimensions très réduites, ce qui permet d'insérer dans le même câble un nombre très important de lignes.

### 1.2.3 Indice de réfraction :

La vitesse de la lumière  $C_0$  dans le vide est de 300.000 km/s, dans le milieu transparent tel que le verre, cette vitesse  $C_1$  va diminuer d'un facteur  $n$ . Ce facteur se nomme indice de réfraction qui est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le matériel est [2] :

$$C_1 = \frac{C_0}{n} \quad (1.1)$$

### 1.2.4 Loi de Descartes :

Lorsque un rayon lumineux traverse un milieu d'indice de réfraction  $n_1$  pour venir frapper un autre milieu d'indice  $n_2$  plus faible, il change de direction et de vitesse et il se divise en deux rayons :

- Un rayon réfléchi : qui se propage encore dans le premier milieu.
- Un rayon réfracté : qui se propage dans le second milieu.

La formule de Descartes pour la réflexion et la réfraction d'onde lumineuse entre deux milieux est :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.2)$$

Où

$i_1$  et  $i_2$  les angles d'incidences aux surfaces par rapport à la normale.

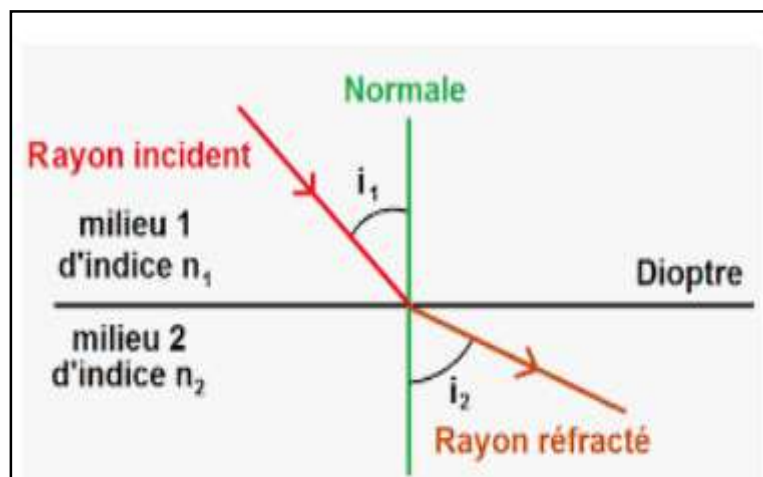


Figure 1.2 : loi de Descartes

Les deux phénomènes de réflexion et de réfraction se produisent en général simultanément. Il existe cependant un cas particulier où toute la lumière est réfléchi c'est la réflexion totale.

### 1.2.5 Principe de guidage de la lumière :

Dans une fibre optique, on se sert du phénomène de réflexion totale interne pour transmettre la lumière sur de très grandes distances.

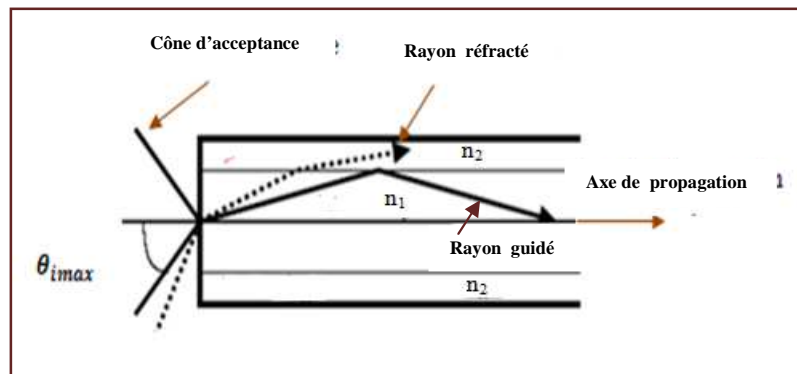


Figure 1.3 : principe de guidage dans une fibre optique

Pour assurer le guidage (pouvoir avoir une réflexion totale à l'interface cœur/gaine), deux conditions doivent être réunies [3] :

- Le rayon doit se trouver dans un milieu d'indice de  $n_1$  entouré d'un autre milieu d'indice  $n_2$  avec :  $n_1 > n_2$
- De plus, pour parvenir à injecter un signal dans la fibre ce signal doit être inclus dans le cône d'acceptante.

### 1.2.6 Angle d'acceptance et ouverture numérique:

- Pour qu'un rayon lumineux se propage dans la fibre par une réflexion totale interne, il doit être injecté dans la fibre selon un angle d'incidence maximal  $\theta_{max}$  appelé «angle d'acceptance», cet angle permet de définir l'ouverture numérique.
- L'ouverture numérique est un paramètre qui permet d'exprimer la capacité d'une fibre de propager un faisceau lumineux ou c'est une mesure de la quantité maximum de lumière qu'un système optique peut accepter, elle est définie par le sinus de l'angle d'acceptance.

$$ON = \sin \theta_{imax} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.3)$$

Un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée dans la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.

### 1.2.7 Mode de propagation :

Les différents rayons lumineux parcourant la fibre sont appelés "modes". Chaque mode étant une solution spécifique de l'équation d'onde, le nombre de modes ne dépend que la fréquence normalisée «  $\gamma$  », pour un rayon  $a$  de la fibre, elle est définie par [4]:

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.4)$$



Cette grandeur permet de calculer la longueur d'onde. Il existe deux types de fibres optiques : multimode et monomode, cette classification peut être déterminée au moyen de la fréquence normalisée " $\gamma$ ".

- Si  $\gamma \leq 2.405$ , la fibre est monomode (une dimension du cœur très petite)
- Si  $\gamma > 2.405$ , la fibre est multimode (une dimension du cœur très élevée).

**Remarque :** Selon l'équation (1.4), la fréquence normalisée est une grandeur sans unité.

Le tableau suivant compare les caractéristiques de ces deux familles de fibres optiques et en donne les champs d'application :

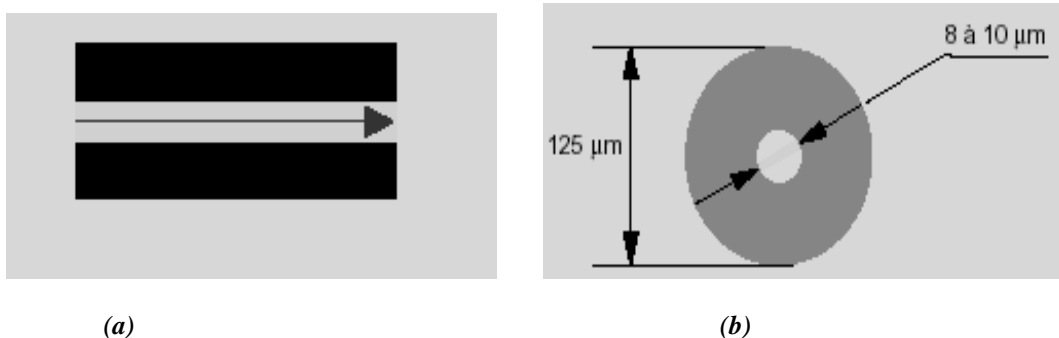
**Tableau (1.1) :** Caractéristique d'une fibre monomode et une fibre multimode

<b>Fibre monomode</b>	<b>Fibre multimode</b>
ON faible (connexion délicate)	ON forte (connexion facile)
Très faible atténuation	Faible atténuation
Faible dispersion	Forte dispersion
Haut débit longues distances	Réseaux locaux

### 1.2.8 Fibres optiques monomodes :

Dans une fibre monomode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur (diamètre de 10  $\mu\text{m}$  et moins). Ainsi le chemin de la lumière est imposé, il n'y en a qu'un seul : celui du cœur. Cette catégorie est employée comme moyen de transmission optique dans les réseaux des télécommunications à cause de leurs avantages [1, 4] :

- ✓ Durée de vie du support de transmission environ 20 ans,
- ✓ Faible perte de puissance et grande quantité d'informations à transmettre,
- ✓ Absence de dispersion modale, compatibilité avec les technologies modernes.



**Figure 1.4 :** (a) trajet du signal dans une fibre monomode et (b) fibre optique monomode.

### 1.2.9 Fibres optiques multimodes :

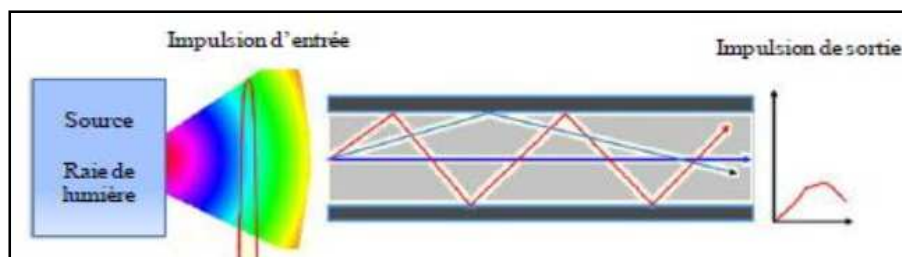
Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur de 50  $\mu\text{m}$  et de gaine de 125  $\mu\text{m}$  et les différents rayons empruntent des trajectoires différentes. Il existe différentes fibres optiques et on en dénombre principalement : fibre optique à saut d'indice et fibre optique à gradient d'indice [4].

#### a. Fibres multimodes à saut d'indice :

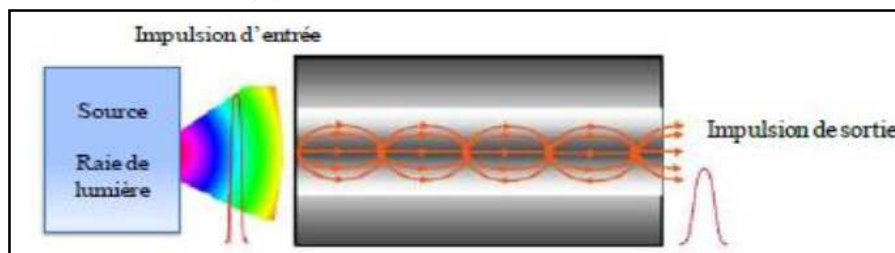
Ce sont les premières fibres optiques produites, dans ce type de fibres, l'indice de réfraction du cœur est constant, il y a changement brusque de l'indice de réfraction entre le cœur et la gaine. La lumière se propage par réflexion interne, elle suit un chemin en zigzag [4].

#### b. Fibre multimode à gradient d'indice :

Dans la fibre à gradient d'indice, le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. Donc l'indice de réfraction diminue graduellement du centre du cœur vers la gaine et les rayons lumineux présentent une allure sinusoïdale.



(a) Fibre multimode à saut d'indice



(b) Fibre multimode à gradient d'indice.

**Figure 1.5 :** types de fibre optique multimode

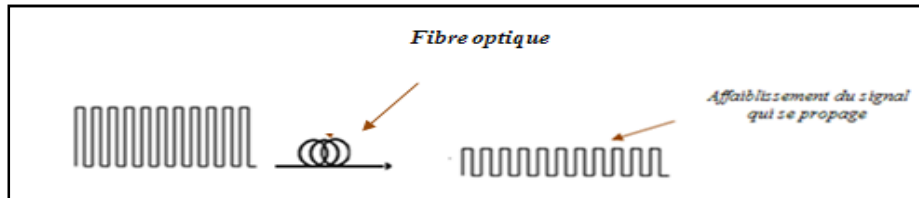
#### 2.1.1 Limitations de la propagation dans une fibre optique :

Dans une fibre optique, le premier phénomène néfaste limitant les débits de transmission est la dispersion chromatique, elle est due à la nature dispersive de la silice (dispersion du matériau). D'autre part l'affaiblissement ou l'atténuation est certainement un des paramètres les plus importants pour une fibre optique, car c'est le facteur qui limite le plus souvent la distance de transmission maximale pour une liaison optique. Ce paramètre est donné généralement sous la forme d'un coefficient d'affaiblissement ou affaiblissement linéique (affaiblissement par unité de longueur). Enfin, les effets non linéaires de différentes natures qui apparaissent lorsque les densités de puissance guidées sont élevées provoquent des générations de fréquences à l'origine de diaphonie entre canaux.

a) **L'atténuation :**

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. En effet, elle correspond à une diminution de la puissance du signal transmis. Elle s'exprime très souvent en décibels (dB) [5]. Le coefficient d'atténuation  $\alpha$  pour une ligne de transmission de longueur L est défini par :

$$\alpha_{(dB/Km)} = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_s}{P_e}\right) \quad (1.5)$$

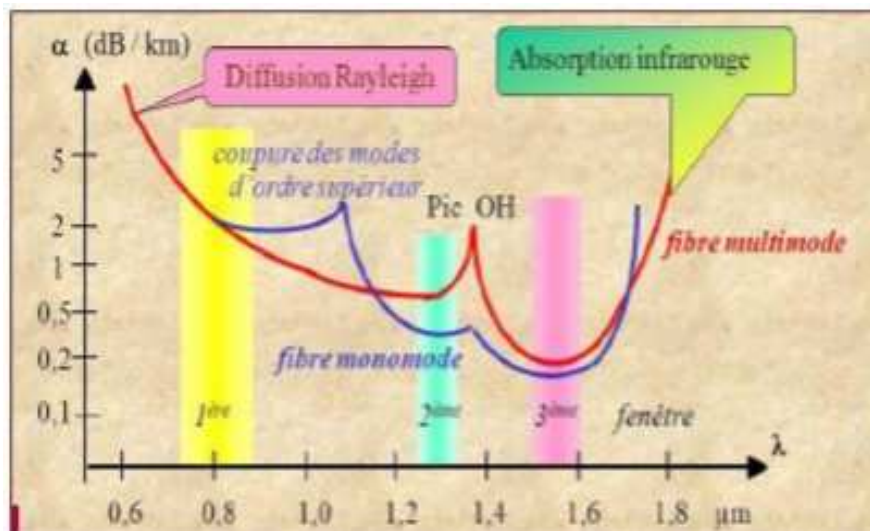


**Figure I.6 :** affaiblissement d'un signal le long d'une fibre optique.

L'atténuation dans les fibres optiques résulte de plusieurs mécanismes :

- ◆ **Pertes extrinsèques :** dépendent du couplage fibre-fibre ou fibre-composants. Les fibres sont toujours utilisées par tronçons de longueur finie, raccordés entre eux. Chaque jonction peut provoquer une perte de raccordement.
- ◆ **Pertes intrinsèques :** dépendent de la nature physico chimique de la fibre optique.

La figure (I.7) montre la courbe d'atténuation d'une fibre en silice standard monomode (SMF pour « Single Mode Fiber »). Les pertes aux basses longueurs d'onde sont liées à la diffusion Rayleigh alors qu'aux hautes longueurs d'onde elles sont engendrées par l'absorption. On voit aussi les effets de vibration de la liaison hydroxyde (OH oxygène hydrogène) et qui présentent un pic de forte atténuation autour de 1400 nm. La figure montre aussi que les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation sont de l'ordre de 0,2 dB/km vers 1550 nm. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques.



**Figure I.7 :** courbe d'atténuation d'une fibre optique.

## b) La dispersion :

La dispersion d'un signal optique se manifeste par une distorsion du signal et cause un élargissement des impulsions au cours de leur propagation dans la fibre optique.

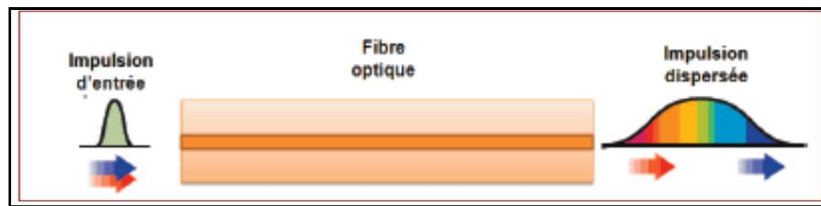


Figure I.8 : dispersion d'une impulsion le long d'une fibre.

Il existe deux types de dispersion :

- ♦ **Dispersion chromatique** qui résulte de la différence de vitesses de groupes des différentes composantes spectrales du signal de transmission. La dispersion chromatique est la combinaison de deux types de dispersion.
- ♦ **Dispersion modale** : l'ensemble des retards entre les différents rayons composant le signal lumineux détermine en réception une distorsion du signal électrique obtenu par le convertisseur optique - électrique, cette distorsion est la dispersion.

Au vu de cette courbe de la figure (I.9), on remarque que pour une fibre monomode (SMF), la capacité de transmission est la plus importante pour une longueur d'onde d'environ  $1,3 \mu\text{m}$  (la dispersion chromatique a une faible influence autour de  $1,3 \mu\text{m}$ ). Malheureusement, ce n'est pas là que l'atténuation est la plus faible. Alors qu'elle devient un obstacle pour la transmission à  $1,55 \mu\text{m}$  où l'atténuation est minimum. Il est possible de déplacer le point de dispersion nulle vers  $1,55 \mu\text{m}$ , on dit que ce genre de fibre (DSF pour « Dispersion Shifted fiber ») est à dispersion décalée.

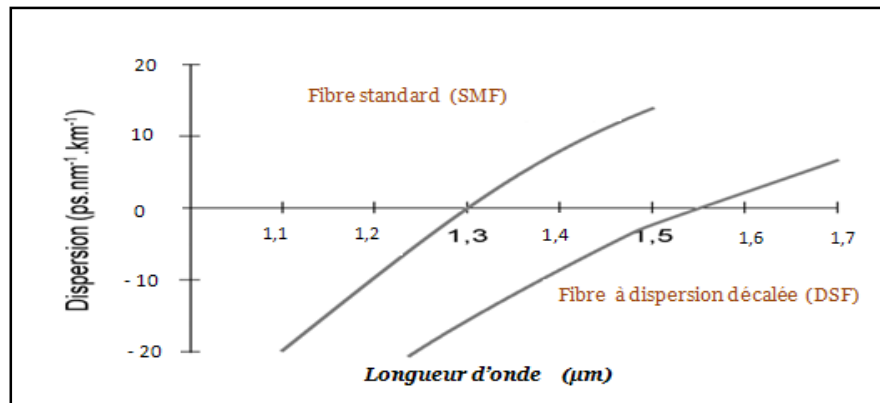


Figure I.9 : courbe de dispersion pour quelques types de fibres monomode.

## c) Les effets non linéaires [6] :

Aujourd'hui, les systèmes de transmission à haut débit utilisent des amplificateurs de puissance, ce qui conduit à des puissances injectées dans la fibre très élevées et l'apparition non-négligeables des effets non linéaires. Les effets non linéaires se traduisent par la réponse d'un milieu diélectrique lorsqu'on applique un champ électromagnétique intense susceptible de modifier les propriétés de la silice.

Ces effets limitent effectivement la capacité de transmission puisqu'ils donnent lieu à des interférences ou des distorsions et limitent le taux d'information transférée dans les canaux à haut débit. Dans les fibres optiques en silice, il est possible de classer les effets non linéaires en deux ensembles :

- ◆ Celles induites par l'indice de réfraction non linéaire (effet Kerr),
- ◆ Celles dues à la diffusion stimulée (Brillouin et Raman).

#### *i. Effets Kerr :*

L'effet non linéaire prépondérant dans une fibre optique est l'effet Kerr optique, il provient de la dépendance de l'indice de réfraction  $n$  à l'intensité  $I$  du champ optique se propageant dans la fibre. Cette dépendance de l'indice de réfraction à l'intensité du signal est à l'origine de certains effets non-linéaires intéressants comme le déphasage auto-induit du signal se traduit par un phénomène d'auto-modulation de phase (SPM: Self Phase Modulation), l'impulsion est affectée d'une modulation de phase parasite qui croît avec la distance et qui combinée à la dispersion chromatique, conduit à un élargissement temporel des signaux se propageant dans la fibre. La non-linéarité induit aussi à une modulation de phase croisée (XPM : Cross Phase Modulation), ainsi que des phénomènes connus sous le nom de mélange à quatre ondes (FWM : Four Waves Mixing), sources d'intermodulation entre les différents canaux d'un système de transmission utilisant plusieurs longueurs d'ondes.

#### *ii. Diffusion stimulée :*

La seconde catégorie d'effets non linéaires évoquée, les diffusions stimulées, provient d'interactions entre l'onde optique se propageant dans la fibre et les modes de vibrations du verre. Ces effets se traduisent par un transfert partiel d'énergie du champ optique vers le milieu de propagation. Deux classes de diffusions stimulées peuvent être distinguées : les diffusions de Raman et de Brillouin stimulées [14].

## **2.2 Câbles optiques :**

### **2.2.1 Fabrication de la fibre optique en silice [7] :**

Les fibres optiques en verre sont presque toujours fabriquées à partir de la silice. La silice  $\text{SiO}_2$  est un composé oxygéné du silicium, présent dans différents matériaux, tels que le Silex sous forme de grains, cristallisée ou fondue. Les indices de réfraction de la silice et le verre fluoré sont d'environ 1,5. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants, tels que :

- ◆ Le germanium et le phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur.
- ◆ Le bore et le fluor qui le font décroître dans la gaine.

Les fibres optiques sont conçues grâce à une préforme cylindrique en barreau de silice.

#### **◆ La préforme en silice**

Une préforme est un cylindre en verre qui peut mesurer un mètre de longueur et quelques centimètres de largeur. Elle servira à fabriquer le cœur de la fibre ainsi que la gaine optique. Le processus de déposition en phase vapeur modifié, utilisé pour produire des matériaux de très haute performance, est aussi utilisé pour réaliser la préforme. Ce processus automatisé permet un rendement de production élevé et est bien adapté à la fabrication de câbles longue distance.

Pour augmenter l'indice de réfraction de la préforme, on insère des produits chimiques dopants puis on restreint la préforme en la chauffant pour refermer le barreau de silice. Une fois la préforme fabriquée, elle passe au contrôle qualité et est placée dans un four pour passer à la phase d'étirage de la fibre.

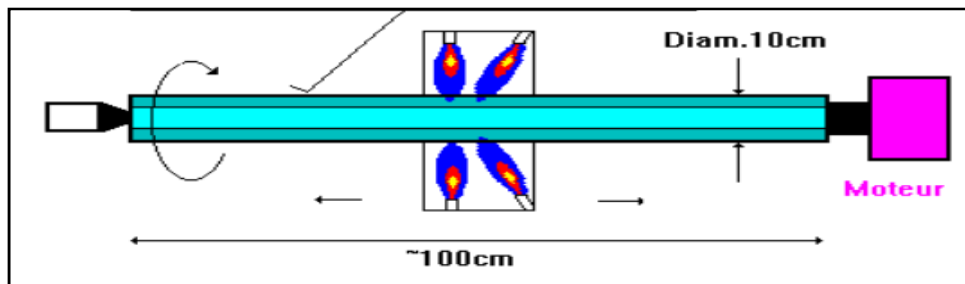


Figure 1.10 : préforme en silice.

♦ *L'étirage de la fibre à partir de la préforme.*

La tour d'étirage dans laquelle va être placée la silice fonctionne à des températures entre 1900 et 2200°C. La machine va tirer la préforme pour obtenir des fibres de verres très fines qui seront enroulées sur une bobine. Pendant l'étirage, le verre sera soumis à un test de diamètre. Ensuite, les fibres seront enrobées par d'un revêtement de protection, se verront attribuer un numéro d'identification unique et seront regroupées pour pouvoir finalement être empaquetées dans des gaines isolantes.

Une fois la fabrication terminée, il faudra tester leur débit, la résistance à la traction, la température de fonctionnement, l'indice de réfraction, la géométrie de fibre, l'atténuation, la dispersion chromatique et autres indicateurs de fonctionnement. Par ailleurs, la fibre va aussi être testée pour connaître sa capacité de conductivité si elle est utilisée dans des applications sous-marines.

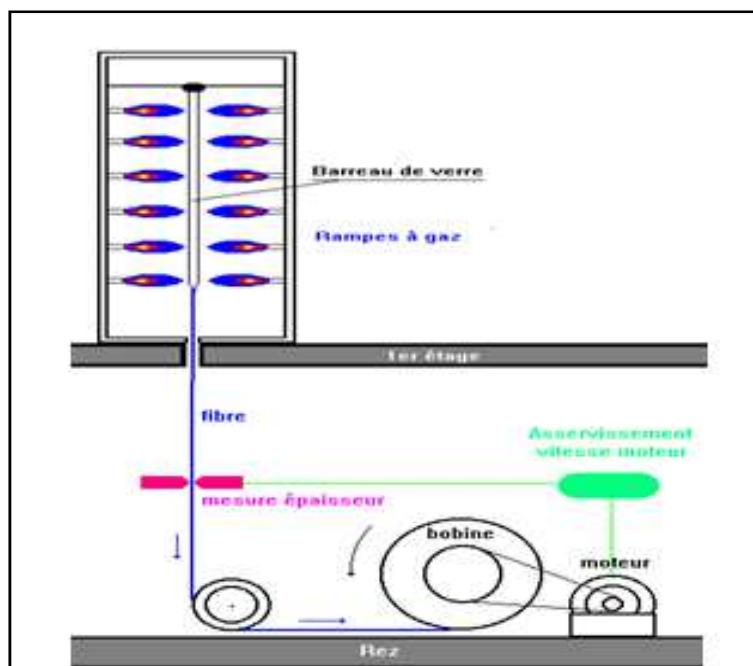


Figure 1.11 : étirage de la fibre optique à partir de la préforme.

### 2.2.2 Câble à fibre optique

Le câble à fibre optique permet de conduire et de protéger la fibre optique d'un point du réseau à l'autre. Il permet le regroupement de 2 à 720 fibres. Un câble à fibres optiques est soutenu avec des fils de renforcement, tel que le **Kevlar** ou de **fibre d'aramide** (matériaux résistant à la chaleur et présentant de bonnes propriétés mécaniques) [8]. Ceci rend un câble plus résistant, assurant ainsi que les fibres optiques ne s'abîment pas lorsqu'elles sont pliées.

Le Kevlar est une fibre synthétique (la **fibre synthétique** est une fibre (ou un fil) produit à partir de matière(s) synthétique(s)) qui possède de très bonnes propriétés mécaniques en traction (résistance à la rupture).

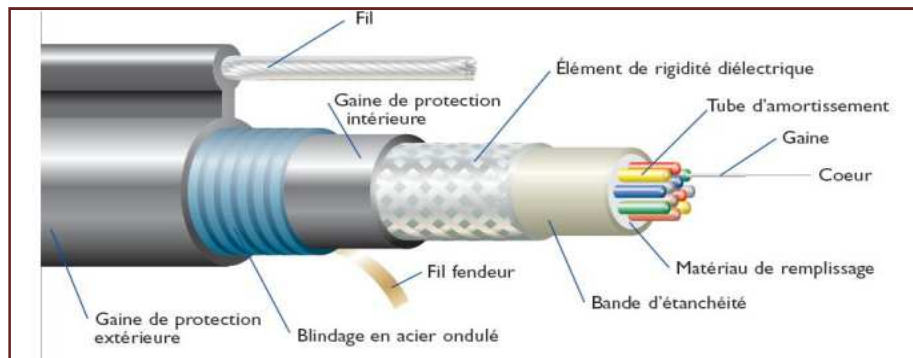


Figure 1.12 : câble optique.

Il existe deux structures principales de câbles [7, 8] :

**i. Serrée**, dite MBO (Mini break out).

En structure serrée, chaque fibre est recouverte d'une couche (revêtement) en plastique, placée directement sur la gaine primaire, qui porte son diamètre extérieur de 250 à 900  $\mu\text{m}$ . Il s'agit d'une structure particulièrement employée pour les liaisons à l'intérieur d'un bâtiment.

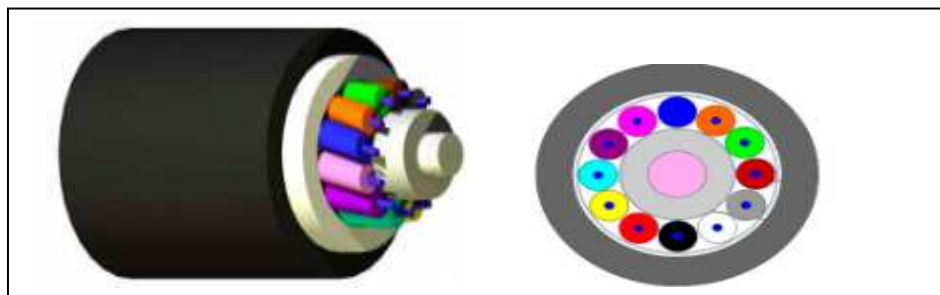
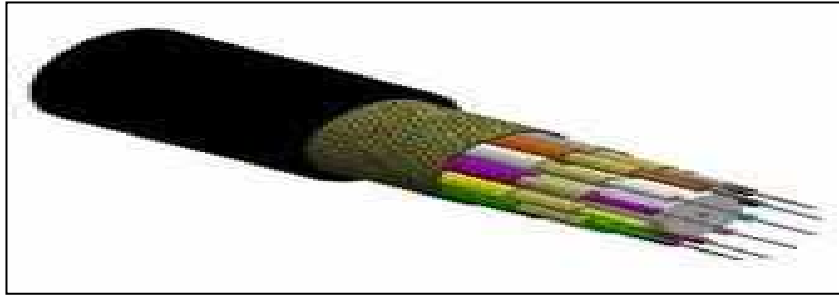


Figure 1.13 : câble optique en structure serrée (mini break out).

**ii. Serrée**, dite break out :

Il est utilisé à l'intérieur d'un bâtiment pour relier plusieurs baies. Ces câbles sont constitués d'un assemblage de 2 à 12 fibres dont les gaines individuelles sont directement appliquées sur la fibre ce qui la renforce mécaniquement et lui apporte la souplesse nécessaire à la réalisation de cordons.





**Figure 1.14 :** *câble optique en structure serrée (break out).*

**iii. Libre**, dite CLT (Central loose tube),

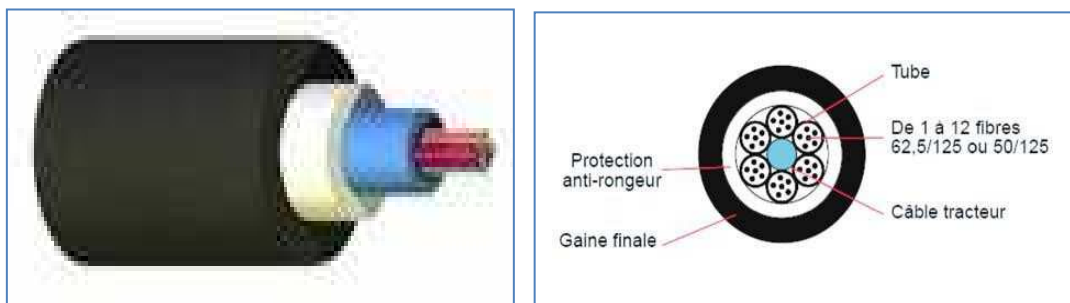
Dans les structures libres, les fibres sont disposées librement dans un tube, par paquets de 4 à 24 (généralement 6 ou 12). Ce type de câble est utilisé pour les liaisons inter-bâtiments.



**Figure 1.15 :** *câble optique en structure libre.*

Il existe d'autres types de câble à fibres optiques:

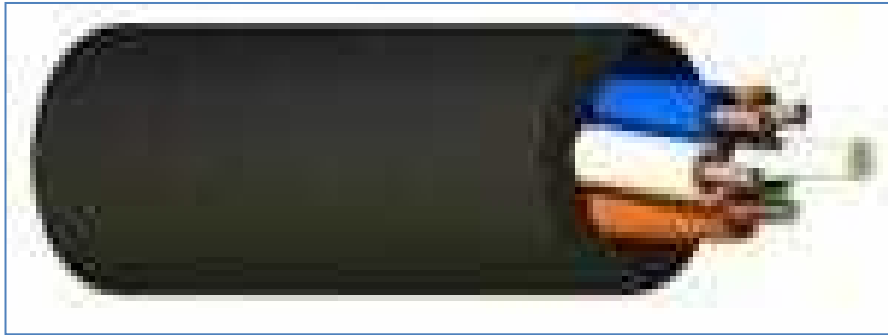
- a) **Le câble optique à tube central** : c'est le câble qui contient n fibres assemblées dans un seul tube (maximum 24 fibres optiques monomodes et/ou multimodes). Il est le plus utilisé pour les liaisons inter-bâtiments de faible capacité.



**Figure 1.16 :** *câble optique tubé central.*

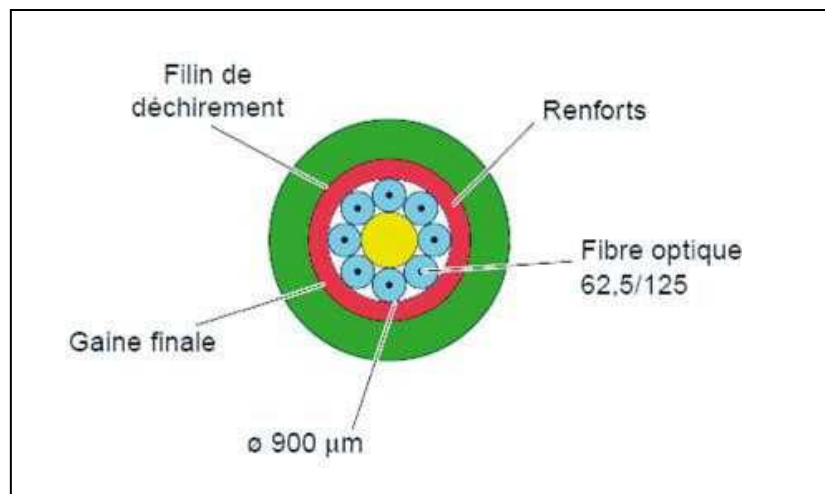


- b) **Le câble optique multitube** : basé sur le principe du câble tubé central, le câble fibre optique multitube est destiné à des câbles de grosse capacité (au-delà de 24 fibres). Il se compose de plusieurs tubes qui englobent chacun 6 ou 12 fibres optiques.



**Figure 1.17** : câble optique multitube

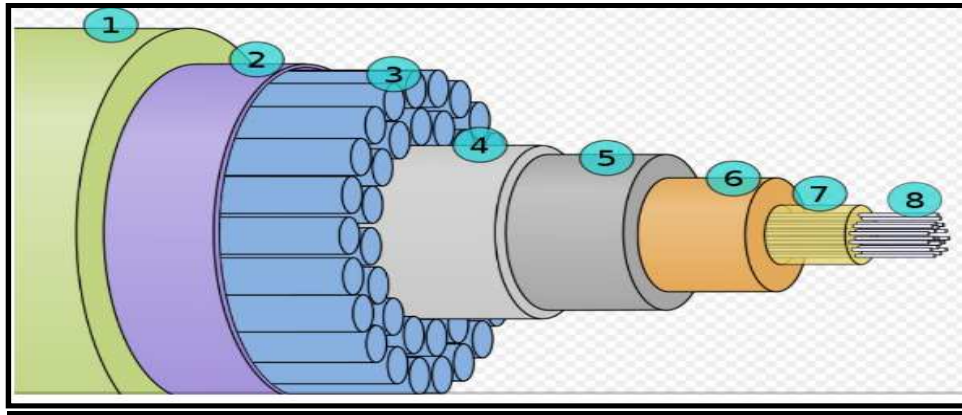
- c) **Le câble optique micro gaine** : c'est un câble dont les fibres sont assemblées dans des micro-gaines (peaux) contiennent un gel hydrofuge qui protège les fibres de l'humidité. Par rapport au câble à tube, la micro-gaine est plus souple, tient moins de volume et se prépare sans outils. Il est utilisé pour des liaisons de forte capacité (288 fibres optiques), donc sur des distances allant jusqu'à une centaine de kilomètres.



**Figure 1.18** : câble optique micro gaine

### 2.2.3 Câble sous-marin

Un câble sous-marin est un câble posé sur le fond marin, destiné à acheminer des télécommunications ou à transporter de l'énergie électrique. La plupart des télécommunications mondiales transitent par des câbles sous-marins, qui sont au nombre de 263 (en 2014) [9]. Le câble évite la perte de temps induite par le temps nécessaire pour effectuer une transmission par satellite (0,24 seconde dans le cas d'un aller-retour vers un satellite géostationnaire).



**Figure 1.19** : Câble optique sous marin.

1. Polyéthylène.
2. Bande de Mylar.
3. Tenseurs en acier.
4. Protection en aluminium pour l'étanchéité.
5. Polycarbonate.
6. Tube en aluminium ou en cuivre.
7. Vaseline.
8. Fibres optiques.

Il existe à l'heure actuelle plusieurs centaines de milliers de kilomètres de fibres optiques sous-marines. En effet, une multitude de liaisons traverse les océans, pour relier les continents entre eux, et ainsi créer ce que l'on appelle le backbone mondial. Il y a deux types de pose de câble sous marin :

- Pose ensouillée: à la zone sensible, le câble est ensouillé à environ 80cm sous le sol par une profondeur de 20 à 1500 m.
- Pose principale: en dehors des zones côtières du plateau continental, la pose s'effectue grâce à une machine à câble installée sur le pont du navire.

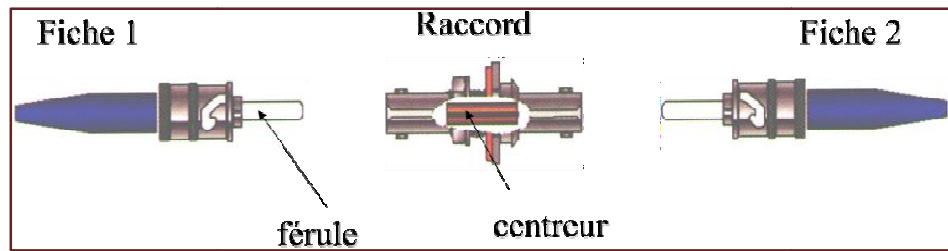
#### ◆ Câble sous-marin Apollo :

Le câble sous-marin Apollo est constitué de 2 parties : Apollo North et Apollo South. Ce câble a été posé en 2002.

- **Apollo North** : Bude (Royaume-Unis) - Shirley (New-York, USA) .
- **Apollo South** : Lannion (France) - Manasquan (New Jersey, USA) .

#### 2.2.4 Connections optiques [9,10] :

Lors de la pose d'une liaison optique, il faut équiper la fibre d'un connecteur aux deux extrémités, permettant ainsi le raccordement, à l'aide de cordons de brassage, aux appareils actifs (commutateurs, routeurs,...). Une connexion optique est composée de deux fiches et d'un raccord. Pour des performances optimales de reproductibilité de la connexion, on utilise généralement des férules et des centreurs céramiques.



**Figure 1.20** : *connections optiques.*

- a) **La fiche** termine la fibre, la protège, la positionne et la rend manipulable. Elle est composée d'un embout optique appelé férule de diamètre 2,5 mm percée en son centre dans lequel est fixé la fibre.
- b) **Le raccord** est composé d'un cylindre fendu ou centreur de diamètre 2,5 mm dont le rôle est d'auto-aligner les embouts optiques l'un en face de l'autre, le raccord réalise le guidage et le verrouillage des deux fiches pour assurer d'une part la continuité du signal optique d'une fibre à l'autre.

### 2.2.5 Raccordement optique [1, 10] :

Le raccordement est une étape importante dans la construction d'un réseau car il correspond à la mise à disposition et à l'exploitation d'un câble optique. Un raccordement sur fibre optique doit être fait en suivant une méthodologie et des règles pour permettre :

- ◆ Le respect des rayons de courbure des fibres et des câbles ;
- ◆ Un passage des fibres limitant tout risque de cassures, de macros ou micro-courbures ;
- ◆ Une identification des différentes connexions et des différentes fibres.

Trois méthodes permettent de réaliser le raccordement fibre optique :

#### a) Montage démontable (connecteurs) :

Le câblage optique est réalisé par collage à chaud ou froid. Le connecteur est monté directement sur la fibre optique et celle-ci est rendue solidaire par collage. L'intérêt du collage à froid est la minimisation des équipements électriques et la rapidité du collage. La performance du raccordement est également déterminée par la qualité du connecteur. En effet, si le connecteur est de bonne qualité, il permettra un bon centrage de la fibre et donc une perte (atténuation) plus faible.



**Figure 1.21** : *les étapes de montage démontable (connecteurs).*

**b) Montage non démontable (soudure) :**

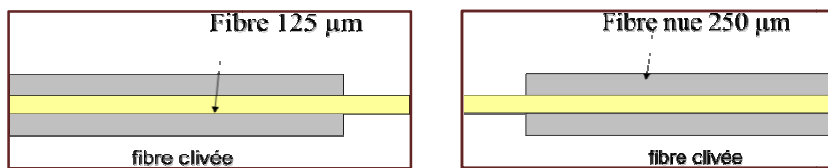
L'épissure est la mise en contact définitive de deux fibres optiques clivées et alignées. Le principal équipement nécessaire est une soudeuse fibre optique et la cliveuse associée. Cette dernière permet de couper la fibre avec un angle précis de  $90^\circ$ . Cet outil est indispensable pour que les deux fibres à connecter aient un angle de coupure identique avec une perte de 0.05dB à 1300 nm et 1550 nm.

La soudeuse fibre optique existe selon deux principes :

- Alignement gaine à gaine : est principalement utilisé pour les applications en fibre multimode.
- Alignement cœur à cœur : Il est privilégié pour la fibre monomode.

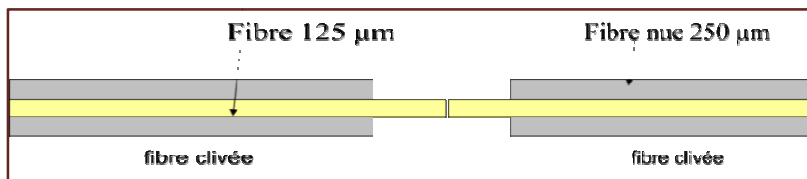
Les étapes de la soudure sont :

- i.** Clivage des deux fibres avant de les placer sur le support :



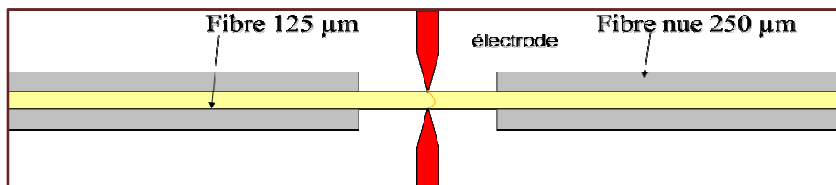
**Figure 1.22 :** *clivage des deux fibres.*

- ii.** Mise en contact des deux fibres :



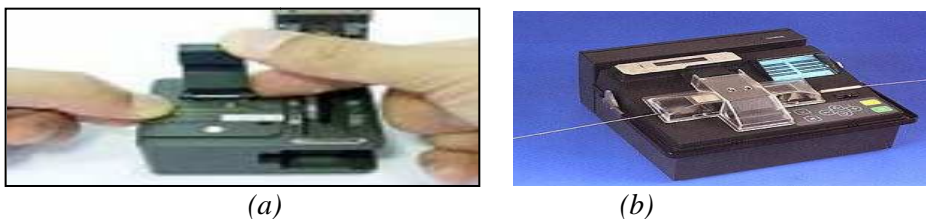
**Figure 1.23 :** *mise en contact des deux fibres.*

- iii.** La fusion est réalisée avec l'aide d'un arc électrique :



**Figure 1.24 :** *la fusion des deux fibres.*

- iv.** Cette épissure sera ensuite protégée mécaniquement par une gaine métallique présente dans un manchon thermo rétractable :



**Figure 1.25:** *présentation d'une cliveuse (a) et d'une soudeuse (b).*

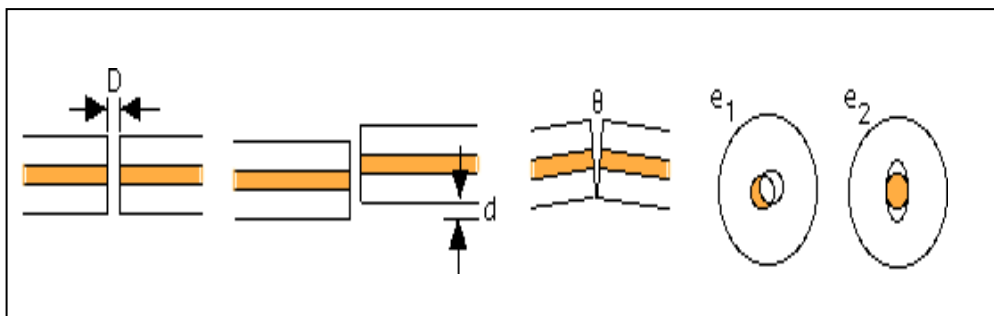
**c) Montage non démontable (l'épissurage mécanique) :**

La méthode mécanique ne nécessite pas l'utilisation d'une machine d'épissurage. Les outils d'installation sont très simples et permettent de fixer les fibres dans une enveloppe (par exemple une rainure en V) de protection de l'épissure, généralement sans qu'il soit nécessaire d'utiliser de l'énergie électrique [10]. Certaines épissures mécaniques peuvent être réglées à la main pour réduire au minimum l'affaiblissement. L'épissurage mécanique s'adapte à tous les types de fibre optique (monomode et multimode) avec une perte de 0.5 dB à 1300 nm et 1550 nm.

**1.3.6 Problèmes liés au raccordement des fibres optiques [1, 5, 9]:**

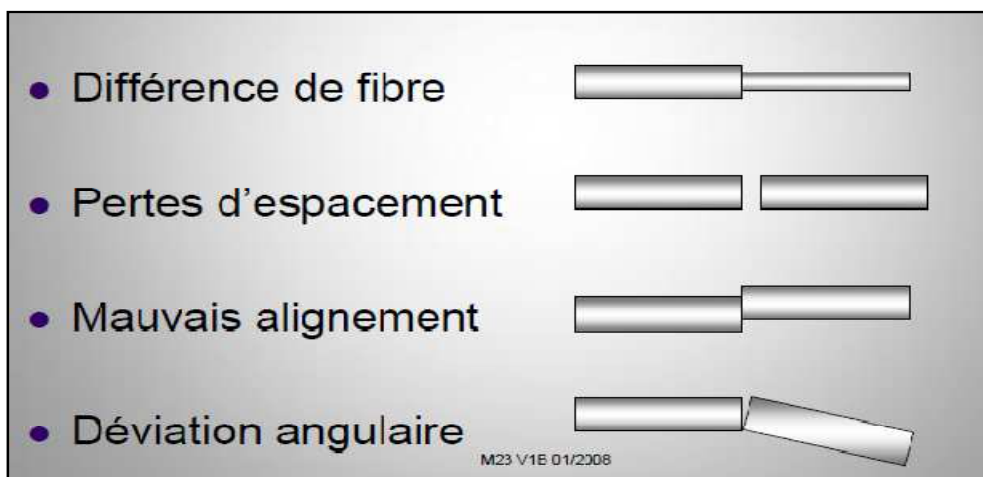
**a) Pertes d'insertion de connections (pertes intrinsèques) :**

Une liaison à fibre optique nécessite toujours un couplage source-fibre ou fibre- détecteur ; celui ci est réalisé par des connecteurs. Une liaison peut également nécessiter le raccordement de fibres entre elles. Cette connexion peut être démontable ou permanente (soudure). Toute interconnexion doit causer le minimum de pertes. Pertes liées aux défauts de positionnement lorsqu'on raccorde deux fibres (un écart longitudinal « D », un écart axial « d », un écart angulaire «  $\theta$  »). Ces défauts de positionnement provoquent une excentricité des cœurs ( $e_1$ ) ou une ellipticité des cœurs ( $e_2$ ).



**Figure 1.26 : pertes liées au connecteur.**

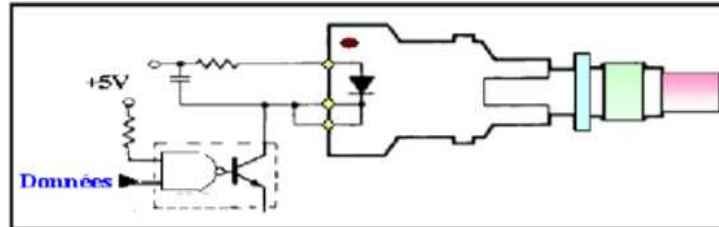
Dans les figures suivantes on va expliquer chaque désalignement :



**Figure 1.27 : types de désalignements.**

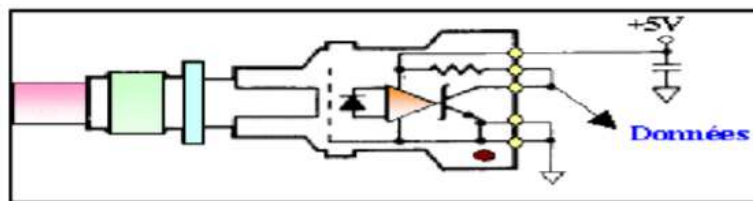
**b) Pertes dues au couplage et au raccordement :**

- ❖ **Couplage émetteur-fibre** : les pertes dans cette liaison dépend à la fois des paramètres de l'émetteur (surface, profil d'indice), des caractéristiques de la fibre (diamètre de cœur, section du cœur profil d'indice, ouverture numérique) et de milieu séparant l'émetteur de la fibre (indice de réfraction et distance émetteur-fibre). Comme, dans le couplage fibre-détecteur.



**Figure 1.28** : couplage fibre-détecteur.

- ❖ **Couplage fibre-détecteur** : le couplage fibre-détecteur a pour but de faire en sorte que toute la lumière qui sort de la fibre entre dans le détecteur. Les surfaces de ses deux dispositifs et la réflexion influent sur cette procédure.



**Figure 1.29** : couplage fibre-émetteur.

- ❖ **Couplage entre deux fibres** : chaque fibre a ses propres particularités et lorsqu'on joint deux fibres de caractéristiques différentes, il y aura donc des défauts de continuité dans le mécanisme de propagation, ce qui peut entraîner des pertes



**Figure 1.30** : couplage fibre-fibre.

**c) Pertes dues aux courbures et micro courbures**

Lorsqu'on courbe la fibre, une partie de l'énergie lumineuse du mode peut échapper au guidage, et se perdre dans la gaine. Ce phénomène s'appelle «pertes par courbure ». Les pertes par micro courbure apparaissent lors de la fabrication des câbles lorsque des contraintes mécaniques provoquent des microdéformations de la fibre, entraînant des pertes de lumière.

Elles sont à peu près indépendantes de la longueur d'onde. Ces pertes dépendent aussi bien de la fibre elle-même que du revêtement. Elles augmentent très vite lorsque le diamètre de la fibre diminue.

#### **1.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la fibre optique et nous venons de décrire les principaux facteurs qui permettent de caractériser la propagation d'un signal lumineux. Nous avons montré comment, alors que l'affaiblissement était le seul paramètre considéré dans les premiers systèmes, il est devenu nécessaire de tenir compte de phénomènes de propagation plus complexes au fur et à mesure qu'augmentaient les débits transmis, les distances et les puissances injectées. nous avons présenté aussi les différents types des câbles optiques et les défauts de raccordement. Au prochain chapitre nous abordons modules d'émission et de réception utilisés dans une chaîne de transmission nécessaires pour aborder l'étude d'une liaison optique.

Les émetteurs  
et  
les récepteurs  
optiques



## Chapitre 2 Les émetteurs et les récepteurs de la lumière

### 2.1 Introduction :

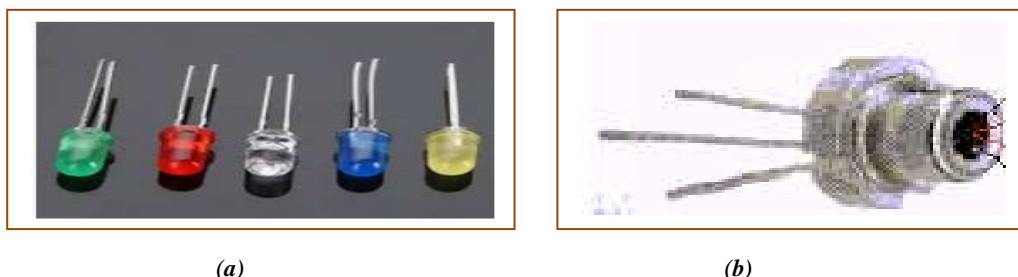
Dans un système de télécommunication, l'émetteur optique joue un rôle prépondérant puisqu'il tient le rôle de source d'émission qui permet de convertir le signal électrique à une forme optique et de l'envoyer à travers la fibre optique jusqu'au détecteur ( Récepteur optique) qui fait l'opération inverse du laser, c'est à dire qu'il convertit un signal optique en un signal électrique. Ce chapitre a l'ambition de décrire simplement les principes physiques généraux des lasers à semi-conducteurs et quelques rappels théoriques en termes de guidage de l'onde, de gain, de condition d'oscillation et les différents types de laser à semi-conducteur (multimodes et monomodes). Nous présentons aussi les principes de fonctionnement des photodiodes, ainsi que leurs principales caractéristiques et applications.

### 2.2 Emetteur de la lumière:

Les systèmes de transmission par fibre optique nécessitent des émetteurs optiques devant remplir certaines conditions [11]:

- ◆ Puissance d'émission importante, coût raisonnable et faible dimension ;
- ◆ Fonctionnement à la température ambiante avec une longue durée de vie ;
- ◆ Largeur spectrale relativement étroite (pour limiter la dispersion chromatique);
- ◆ Capacité à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant.

Les composants d'émission les mieux répondus à ces critères sont des composants à semi conducteurs et se regroupent en deux catégories: La diode électroluminescente et la diode laser.



**Figure 2.2** : présentation d'une diode électroluminescente (a) et diode laser (b).

### 2.2.1 Diode électroluminescente (DEL) :

Le mot LED signifie Light Emitting Diode ou diode électroluminescente (DEL). Une LED est un semi-conducteur qui émet de la lumière quand du courant le traverse. Les matériaux semi-conducteurs que les LED utilisent, transforment l'énergie électrique en un rayonnement électromagnétique visible, c'est-à-dire en lumière.

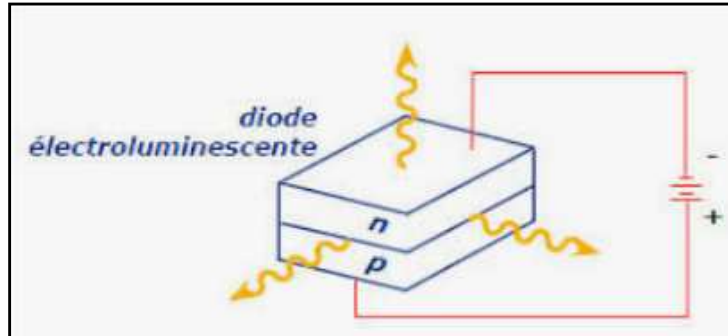


Figure 2.2 : structure d'une diode électroluminescente.

#### a) Caractéristiques du DEL :

Les diodes électroluminescentes sont peu chères, faciles à utiliser, moins rapides, uniquement multimodes et produisent un faisceau plus large. Elles produisent un faisceau moins concentré et moins puissant que les lasers donc elles sont plus difficiles à coupler avec les fibres, ce qui les limite aux fibres multimodes.

#### ➤ Spectre de la diode électroluminescente :

LED se caractérisent par un faisceau fortement divergent et un spectre optique « large bande ». Ce spectre de largeur typique ( $\Delta\lambda = 50 - 60 \text{ nm}$ ). D'où un usage limité aux liaisons à courte distance et bas débit ( $< 622 \text{ Mbit/s}$ ).

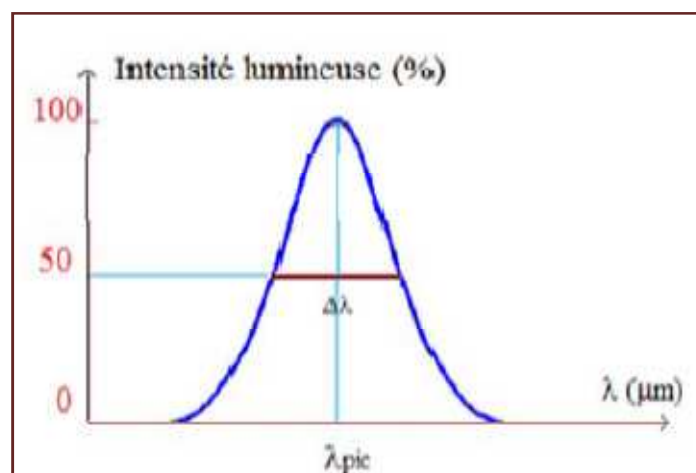
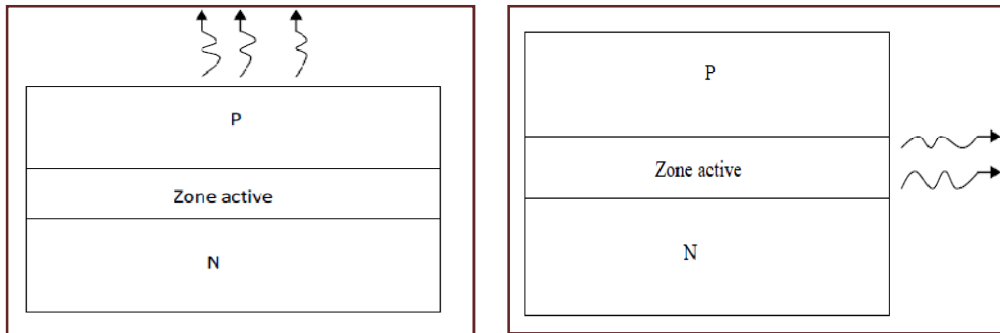


Figure 2.3 : spectre d'émission d'une LED.

➤ **Direction d'émission :**

On rencontre deux catégories de diode électroluminescente, suivant la direction d'émission de la lumière :

- ◆ Les diodes électroluminescentes à rayonnement normal, pour lesquelles l'émission se fait dans la direction perpendiculaire au plan de la jonction.
- ◆ Les diodes électroluminescentes à rayonnement latéral, pour lesquelles le rayonnement se fait dans un plan parallèle à celui de la jonction.



**Figure 2.4 :** modes d'émission d'une LED.

**b) Types du DEL :**

On distingue plusieurs familles de diodes électroluminescentes. Les plus utilisées en télécommunication optique sont les émetteurs par la surface et les émetteurs par la tranche et les diodes super luminescents DSL [12]. A l'heure actuelle nous pouvons trouver des LED dont les longueurs d'onde balayent le spectre visible. Les valeurs présentes dans ce tableau sont celles rencontrées couramment sur les LED du commerce.

**Tableau 2.1 :** familles de diodes électroluminescentes

Matériaux	Rayonnement	Longueur d'onde
<b>InAs</b>	Ultra-violet	315 nm
<b>InP</b> (Phosphure d'indium)	Infrarouge	910 nm
<b>AlGaAs</b>	Rouge, infrarouge	660 nm, 1000 nm
<b>GaAs</b>	Jaune	590 nm
<b>GaP</b> (Phosphure de gallium)	Vert	560 nm
<b>SiC</b> (Carbure de silicium)	Bleue	470 nm

c) *Utilisations du DEL :*

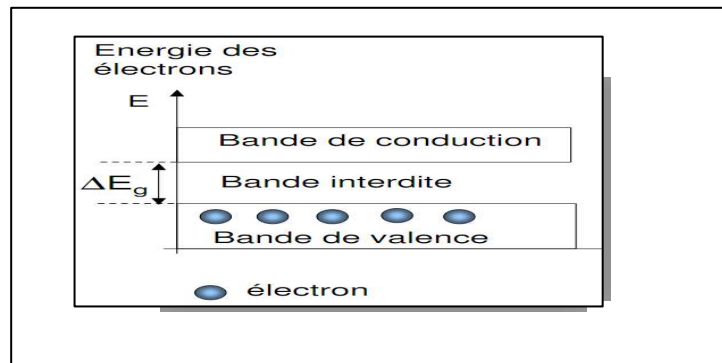
- Feux arrière LED de voiture ou de bicyclettes;
- Signalisation routière ;
- Signalisation ferroviaire ;
- Éclairage invisible pour caméras de surveillance (dans l'infrarouge) ;
- Signalisation d'état d'appareils divers (lampes témoins, tableaux de bord de voitures;
- Affichage numérique d'appareils de mesure, de calculatrices, d'horloges;
- Détecteurs de mouvement (souris optique).

d) *Principe de fonctionnement du DEL :*

i. **Rappel photonique**

◆ **Niveaux d'énergie :**

Chaque atome d'un cristal est caractérisé par un niveau d'énergie. Les niveaux très proches de tous les atomes d'un cristal forment des bandes d'énergie [13] :



**Figure 2.5 :** bandes d'énergie.

- ◆ Dans les semi-conducteurs, à la température du zéro absolu, il existe une bande, appelée **bande de valence**, dont tous les états d'énergie sont occupés par des électrons.
- ◆ Toutes les bandes supérieures sont vides, en particulier la **bande de conduction** située immédiatement au dessus de la bande de valence.
- ◆ Ces deux bandes sont séparées par une largeur  $\Delta E_g$  (g pour gap) appelée bande interdite.
- ◆ Un électron de la bande de valence peut passer dans la bande de conduction à condition d'acquérir une énergie supplémentaire au moins égale à  $\Delta E_g$ . C'est **l'effet photoélectrique**.
- ◆ Un électron de la bande de conduction peut passer dans une bande de valence. Dans ce cas il libère une énergie au moins égale à  $\Delta E_g$ . Cette énergie peut être dissipée sous forme de chaleur (phonons) ou sous forme de lumière (photons). C'est **l'effet électroluminescence** (visible ou non).

### ◆ Absorption :

Sous l'effet de l'agitation thermique, ou de tout apport d'énergie extérieure, par exemple provenant d'un photon, un électron peut s'arracher à son atome d'origine pour se déplacer librement dans le cristal. L'électron passe ainsi de la bande de valence à la bande de conduction. Cet électron laisse dans la bande de valence une lacune d'électron appelée trou qui se déplace aussi lorsqu'un électron voisin le remplit. L'atome est alors dans un état excité.

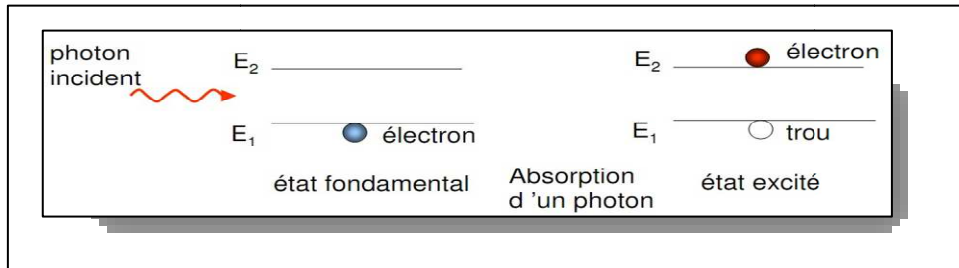


Figure 2.6 : phénomène de l'absorption.

### ◆ Émission spontanée :

Un atome dans l'état fondamental n'émet pas de lumière. Par contre un atome excité est dans un état instable. Il tend à revenir spontanément dans son état fondamental en libérant la quantité (quantum) d'énergie qu'il a reçue sous la forme d'une radiation lumineuse (photon).

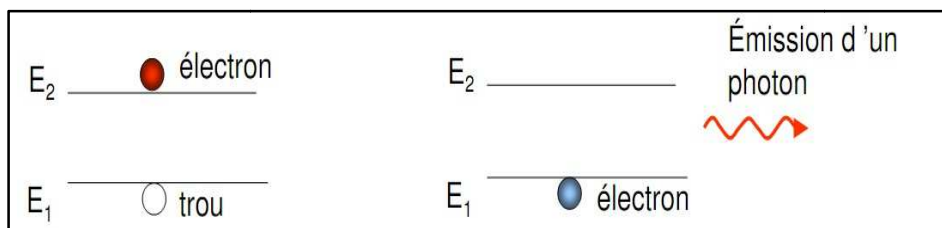


Figure 2.7 : phénomène de l'émission spontanée.

### ◆ Émission stimulée :

Un atome dans l'état excité frappé par un photon peut retomber dans l'état fondamental en émettant un autre photon. Il s'agit d'émission stimulée. Ce nouveau photon produit par émission stimulée a la même longueur d'onde, la même phase, le même état de polarisation et la même directivité spatiale que le photon incident. La lumière émise par émission stimulée est cohérente.

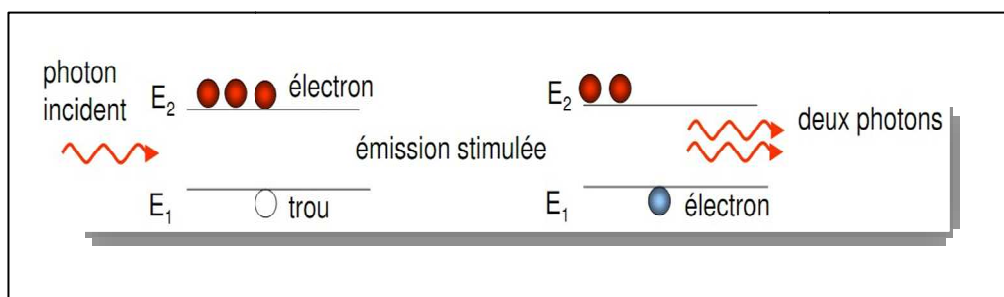


Figure 2.8 : phénomène de l'émission stimulée.

## ii. Fonctionnement du DEL

Une diode DEL est le composant le plus simple, qui réalise directement l'émission de photons par recombinaison des porteurs dans une hétérojonction (ou homojonction) polarisée en direct. Elle est constituée d'une jonction p-n et d'une zone active au cœur de celle-ci (c'est là que vont avoir lieu les recombinaisons électrons-trous). Dans une DEL, l'émission se fait sous forme d'émission spontanée.

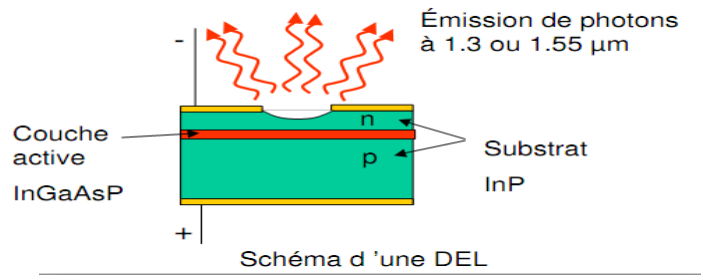


Figure 2.9 : principe de fonctionnement du DEL.

### 2.2.2 Diodes laser (DL):

Une diode laser est un composant optoélectronique à base de matériau semi-conducteur, elle est capable de produire une lumière monochromatique cohérente (spectre très étroit) par émission stimulée comme l'indique l'acronyme dont le mot est issu : Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation [14].

#### a) Eléments constitutifs d'un laser :

Les trois principales composantes d'un laser sont les suivantes : un milieu actif, un mécanisme de pompage et un résonateur optique, un système laser peut être schématisé dans la figure 2.10 :

- ◆ **Le milieu amplificateur** : il est composé des atomes que l'on va venir exciter. Ce milieu peut être liquide ou semi-conducteur (à base d'Arséniure de Gallium GaAs typiquement).
- ◆ **La source de pompage** : elle permet d'exciter les atomes du milieu amplificateur (l'inversion de population) en injectant de l'énergie. Cette source peut être d'origine électrique ou lumineuse (optique).
- ◆ **Le résonateur optique (cavité optique)** : un miroir qui réfléchit tous les photons incidents et un miroir semi-réfléchissant qui laisse passer entre 1% et 10% des photons incidents qui constitue le faisceau laser et réfléchit le reste du rayonnement.

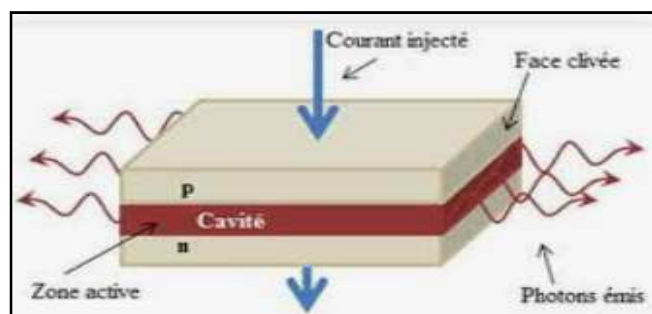


Figure 2.10 : structure du laser DL.

b) *Principe et fonctionnement d'un laser [15]:*

Un laser est un dispositif qui émet de la lumière grâce au phénomène d'émission stimulée, deux conditions bien connues doivent être réalisées afin de favoriser cette émission et obtenir l'effet laser :

- ◆ Il faut qu'il y ait suffisamment d'électrons dans l'état d'énergie supérieure. lorsque ceci a lieu, on obtient une inversion de population. Dans un semi-conducteur, cette inversion est réalisée par l'opération de pompage électrique.
- ◆ Il faut que le nombre de photons incidents spontanés dépasse un certain seuil. Pour cela, on les confine au sein du semi-conducteur dans une cavité résonante.

Le seuil de l'effet laser est obtenu lorsque le gain maximal compense toutes les pertes que l'onde rencontre au cours de ses allers-retours entre les deux miroirs du résonateur.

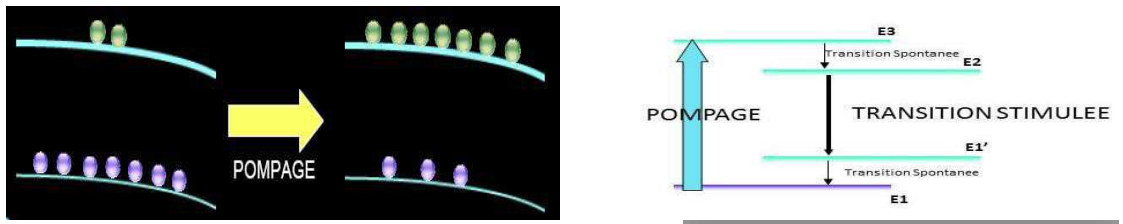


Figure 2.11: *l'inversion de population du laser DL.*

c) *Caractéristiques de la diode laser :*

i. **Caractéristique puissance-courant**

On peut caractériser le laser à semi-conducteur par la caractéristique puissance optique-courant injecté  $P(I)$ , cette puissance lumineuse, émise par la diode laser, est mesurée en fonction du courant injecté.

La figure indique le spectre d'émission du laser, pour des courants de pompe respectivement au-dessus et en-dessous du courant de seuil ( $I_{seuil}$  ou  $I_{th}$ ).

- Pour  $I < I_{seuil}$ ,. Lorsqu'un faible courant lui est appliqué, l'émission stimulée est négligeable, seule l'émission spontanée est présente, une diode laser émet de la même manière qu'une LED. L'inversion de population n'a encore pas lieu.
- Pour  $I > I_{seuil}$ , l'émission stimulée est prépondérante. Dès que l'inversion de population atteint la valeur de seuil, la puissance optique émise par émission stimulée augmente très rapidement.

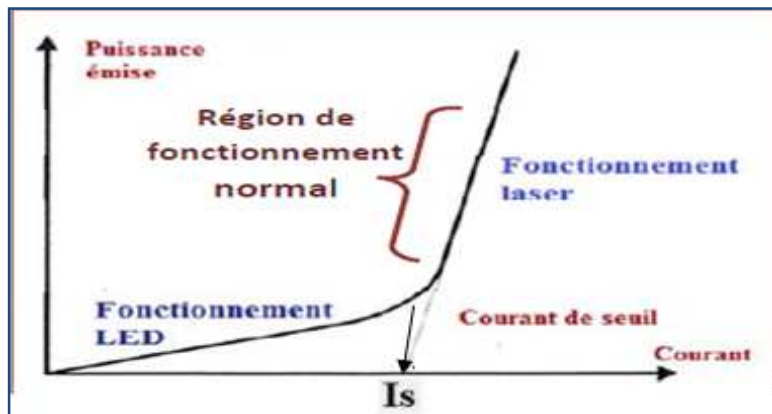


Figure 2.12: *caractéristiques de la puissance du laser DL.*

## ii. Spectre d'une diode laser

Le spectre d'une diode Laser est composé de raies plus ou moins étroites, aux multiples de la fréquence de résonance de la cavité Laser. Il existe des diodes Lasers quasiment monochromatiques (une seule raie très étroite).

- ◆ La longueur d'onde centrale est donnée par le matériau de la couche active.
- ◆ L'espace entre les raies appelé Intervalle Spectral Libre (ISL) est donné par la longueur  $L$  de la cavité, l'indice  $n$  de la couche active du laser, et la longueur d'onde centrale. L'ISL est de l'ordre du nanomètre.
- ◆ Seules les longueurs d'onde du peigne centrale sont amplifiées par le matériau (sur une plage typique de 30 nm).

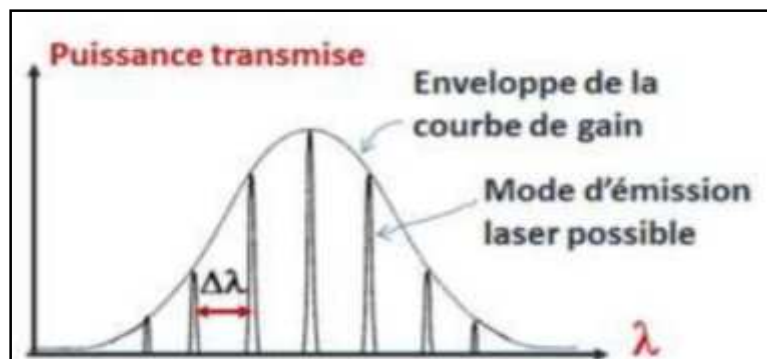


Figure 2.13: caractéristique du spectre du laser DL.

### d) Différents types de laser :

Selon le milieu amplificateur. Il existe plusieurs types de milieux amplificateurs possibles [15] :

- **Lasers à solide** : les lasers à solide utilisent des cristaux, des céramiques ou des verres dopés avec différents atomes comme milieu amplificateur de la lumière. Ce sont les lasers les plus puissants. , exemple : Lasers YAG dopés au Néodyme.
- **Lasers à liquide** : dans les lasers à liquide, le milieu d'émission peut être un colorant organique.
- **Laser à gaz** : le milieu générateur de photons est ici un gaz contenu dans un tube isolant (verre, quartz ou céramique). Exemples : laser Hélium – Néon et laser CO<sub>2</sub>.
- **Laser à semi-conducteurs** : ces lasers utilisent comme matériaux des semi-conducteurs (à base d'Arséniure de gallium GaAs) .

Tableau 2.2 : familles de diodes DL.

Type de laser	Milieu laser	Couleur	Applications
<b>Diode laser</b>	Semi-conducteur	Rouge (780 nm) , infrarouge IR (1300 ,1550 nm)	Lecture DVD Télécommunications
<b>CO<sub>2</sub></b>	Mélange gazeux	Infrarouge IR (1060 nm)	- Chirurgie interne et externe, soudure des matériaux
<b>Nd- YAG</b>	Solide	Infrarouge IR (1060 nm)	- Chirurgie interne et externe, - Soudure des matériaux



Les lasers semi-conducteurs sont classés d'après leur cavité :

**Tableau 2.3** : types de lasers semi-conducteurs.

Composant	Fabry-Perot (multimode)	DFB et DBR (monomode)	VCSEL (multimode)
Largeur spectrale	Plusieurs raies	Une raie très finie = 0.5 nm	Une raie = 2 à 10 nm
Courant de seuil	10 à 30 mA	10 à 30 mA	5 à 10 mA
Bruit	Faible	Faible	Très faible
Longueurs d'onde	1300 nm	1300 et 1500 à 1600 nm	780 à 900 nm
Coût	Moyen	Elevé	Assez faible
Applications	Transmission longue distance à 1300 nm	Transmission longue distance à 1550 nm (fibre monomode)	Transmission Courte distance (fibre multimode)

### 2.3 Récepteur de la lumière:

Un détecteur optique ordinaire produit une tension de sortie qui est proportionnelle à la puissance optique incidente. Il convertit les signaux optiques incidents en signaux électriques. Leurs caractéristiques principales sont [15]:

- ◆ une grande sensibilité (ils doivent être adaptés à la longueur d'onde de la source) ;
- ◆ une grande bande passante ; pas d'influence des conditions extérieures sur les caractéristiques

Deux types de dispositifs à semi-conducteurs répondent à ces conditions. La photodiode **P.I.N** et la photodiode **P.D.A.**



**Figure 2.14** : (a) la photodiode PDA et (b) la photodiode PIN.

#### 2.3.1 Photodiode PIN :

##### a) Définition :

La photodiode PIN est un composant optoélectronique ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Elle est utilisée dans de nombreuses applications industrielles. Comme beaucoup de diodes en électronique elle est constituée d'une jonction PN.

Cette configuration de base fut améliorée par l'introduction d'une zone intrinsèque (I), intercalée entre une région fortement dopée p et une autre fortement dopée n, pour constituer la photodiode PIN.

- ◆ En absence de polarisation (appelé mode photovoltaïque) elle crée une tension.
- ◆ En polarisation inverse par une alimentation externe (photoconducteur), elle crée un courant.

**b) Principe de fonctionnement :**

Lorsqu'un photon pénètre dans le semi-conducteur muni d'une énergie suffisante, il génère, du fait de son absorption, des photoporteurs (pairs électrons et trous d'électrons). Lors de l'absorption d'un photon, deux phénomènes peuvent se produire :

- **La photoémission** : c'est la sortie de l'électron hors du matériau photosensible. L'électron ne peut sortir que s'il est excité près de la surface.
- **La photoconductivité** : l'électron est libéré à l'intérieur du matériau. Les électrons ainsi libérés contribuent à la conductivité électrique du matériau.

Ces derniers sont alors dissociés sous l'action du champ E et chacun de ces photoporteurs est propulsé vers la région dans laquelle il sera majoritaire (l'électron rejoignant la zone N, le trou la zone P). Le déplacement de ces porteurs est à l'origine du photocourant.

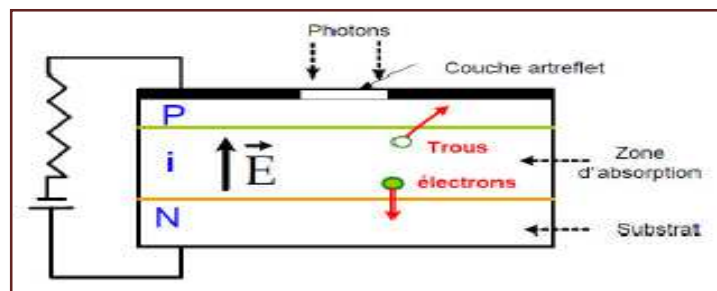


Figure 2.15: schéma synoptique d'une photodiode PIN.

**2.3.2 Photodiode à avalanche (PDA ou APD : Avalanche Photodiode Detectors) :**

**a) Définition :**

Une photodiode à avalanche est un composant optoélectronique qui convertit un flux lumineux en courant électrique. Il se distingue des autres détecteurs par l'effet avalanche (quand la polarisation inverse est augmentée suffisamment, il se produit un effet d'avalanche et le courant produit optiquement peut être amplifié) qui permet de générer un gain très important par rapport à une PIN standard [16]. Ce gain permet de détecter des flux lumineux très faibles.

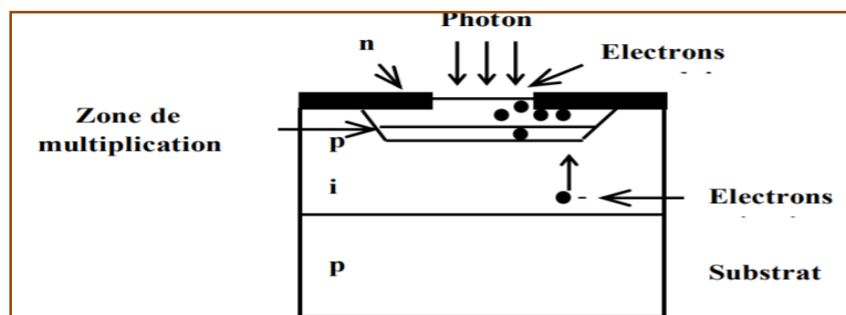


Figure 2.16 : schéma synoptique d'une photodiode APD.

### 2.3.3 Comparaison entre la photodiode PIN et la photodiode APD :

- ◆ La photodiode PIN est plus stable que l'APD en présence des fluctuations de température et de la tension appliquée,
- ◆ Par contre Le détecteur APD est caractérisée par un rendement quantique élevé dans le proche infrarouge mais avec un bruit et une instabilité temporelle élevés.

⋮

**Tableau 2.4** : comparaison entre la photodiode PIN et la photodiode PDA.

Types de photodiode Caractéristiques	Photodiodes	
	PIN	PDA
Tension de commande	Faible	Elevé
Fréquence de coupure	>60 (GHz)	Quelques (GHz)
Rendement quantique	Faible	Elevé
Bande passante	Large	Faible
Longueur d'onde	1300 et 1550 (nm)	1300 et 1550 (nm)

### 2.3.4 Paramètres d'une photodiode :

Les paramètres importants, dépendant du matériau et de la structure, qui caractérisent une photodiode PIN sont la sensibilité, le courant d'obscurité et le rendement quantique. Le photocourant  $I_{ph}$  est directement proportionnel à la puissance optique incidente  $P_{opt}$  selon la relation suivante :

$$I_{ph} = S \cdot P_{opt} + I_{obs} \quad (2.1)$$

#### a) Courant d'obscurité :

Le courant d'obscurité correspond au courant permanent délivré par le dispositif photosensible en l'absence de flux lumineux (obscurité) et lorsque le capteur est polarisé dans les conditions d'utilisation. La photodiode doit être choisie de telle manière que le courant d'obscurité soit très inférieur au courant photoélectrique correspondant au signal lumineux minimum reçu.

$I_{obs}$  est peut avoir des origines multiples : génération thermique dans la zone intrinsèque, courants de surface, courants de fuite. Dans la plupart des applications ce courant est négligeable ( $I_{obs} < 10$  nA). En ce qui concerne le temps de réponse, les meilleurs photodétecteurs actuels sont utilisables jusqu'à plus de 100 GHz.

#### b) Sensibilité :

Une des caractéristiques principales des photodétecteurs est appelée responsivité ou sensibilité. Elle caractérise la conversion optique-électrique du photodétecteur et elle est définie comme le rapport du

courant photo-généré  $I_{ph}$  sur la puissance optique incidente  $P_{opt}$  et elle est exprimée en Ampère par Watt.

$$S(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad (2.2)$$

**c) Rendement quantique ( $\eta_q$ ) :**

Représente le rapport du nombre de paires de porteurs « photo-crées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.

$$\eta_q = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \quad (2.3)$$

Où

$e$  : est la charge élémentaire de l'électron

Le rendement quantique et la sensibilité sont reliés par les relations suivantes, avec  $e$  représentant la charge élémentaire de l'électron,  $h$  la constante de Planck,  $\lambda$  la longueur d'onde et  $c$  la vitesse de la lumière :

$$S(\lambda) = \eta_q \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (2.4)$$

**d) Bruit du photo-détecteur :**

Le signal électrique émis par la photodiode n'est pas parfait, Il est plutôt affecté par des bruits qui contribuent à la dégradation des performances des systèmes de communication. Deux mécanismes fondamentaux de bruit, bruit de grenaille et bruit thermique, conduisent à des fluctuations dans le courant même lorsque le signal optique incident a une puissance constante.

**2.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure et le principe de fonctionnement des émetteurs optiques (DEL et DL) et le récepteur optiques (PIN et APD), qui sont des éléments essentiels dans la communication par fibre optique, leur rôle est de l'émission et la réception du signal optique. Nous avons abordé également leurs différents types et leurs caractéristiques.

## L'amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium EDFA

## Chapitre 3 Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium EDFA

### 3.1 Introduction :

L'évolution des systèmes de télécommunications optiques a connu une révolution avec la mise au point et le développement industriel des amplificateurs optiques à la fin des années 80 [17]. Ils sont devenus alors une alternative aux complexes répéteurs-régénérateurs optoélectroniques. Ces composants devant fonctionner à grands débits sont chers, complexes, délicats à réaliser. L'amplification optique est ainsi à l'origine d'une véritable révolution dans le domaine des télécommunications, vu les avantages que cette technologie procure en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM).

### 3.2 Intérêt de l'amplification optique :

L'amplificateur optique offre l'avantage d'amplifier les signaux dont la longueur d'onde correspond à leur plage de sensibilité sans tenir compte du débit de transmission et du format de modulation utilisé [2]. Cependant, il présente l'inconvénient d'introduire du bruit dans le signal optique lorsque celui-ci le traverse (figure 3.1).

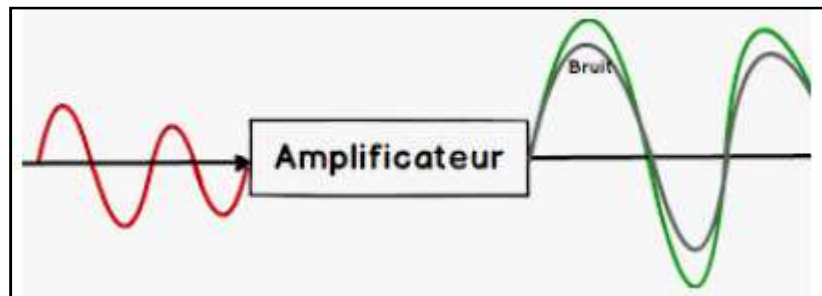


Figure 3.1 : principe de l'amplificateur optique

Les paramètres qui déterminent la qualité d'un amplificateur optique sont [3,17] :

- ◆ Le gain exprimé en décibels, qui exprime le rapport entre la puissance du signal d'entrée et le signal de sortie.
- ◆ Le gain efficace, exprimé en décibels par milliwatt, qui exprime le rapport entre le gain et la puissance utilisée. La largeur de bande des fréquences amplifiables.
- ◆ Les deux dispositifs répondant à ces critères sont : les amplificateurs optiques à semi conducteurs, les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium.

### 3.3 Principe physique de l'amplification optique :

L'amplification optique est basée sur un principe physique qui décrit les phénomènes d'interaction entre les électrons de la matière et les photons. Cette interaction donnera naissance à des transitions entre les différents niveaux d'énergie, ces phénomènes ont été décrits théoriquement par Einstein en 1917 [18], qui les a classés en trois catégories : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée.

Le processus d'amplification est expliqué schématiquement sur la figure ci-dessous. L'onde incidente de fréquence  $\nu$ , et de puissance  $P_e$ , pénètre dans le milieu rendu amplificateur par inversion de population et ressort après un unique trajet de longueur  $L$ , car les faces d'entrée et de sortie ont un pouvoir réflecteur nul (et ce grâce au traitement anti-reflet) .

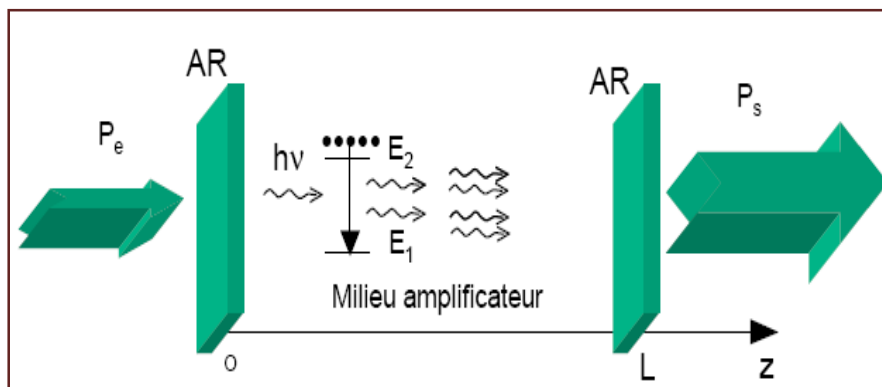


Figure 3.2 : principe de l'amplificateur optique.

La puissance croît à la traversée du milieu amplificateur selon :

$$P_s = P_e \cdot \exp^G \quad (3.1)$$

Où  $G$  est le gain à la fréquence  $\nu$ .

### 3.4 Amplificateur optique à fibre dopée à l'erbium EDFA:

Les amplificateurs optiques à fibre dopée à l'erbium ou les EDFAs sont les dispositifs des plus utilisés pour l'amplification des signaux optiques. Cette technologie n'a pas seulement résolu l'atténuation du taux de transmission optique et les limitations de distance et, plus important encore, elle a permis le multiplexage en longueur d'onde 1550 nm, ce qui permettra à haute vitesse et de grande capacité [19].

#### 3.4.1 Intérêt de l'erbium:

L'erbium est un élément chimique de symbole Er et de numéro atomique 68 qui peut exister en contact d'une source lumineuse d'une longueur d'onde spécifique. Ce sont les signaux de longueur d'onde de (800, 980, 1480) nm qui font réagir les ions et vont dégager une énergie nécessaire à l'amplification des signaux lumineux. L'intérêt majeur de l'ion erbium réside dans l'existence de transitions radiatives autour de 1,55 $\mu$ m. L'efficacité d'un ion d'erbium à émettre (ou à absorber) un rayonnement est caractérisée par les spectres des sections efficaces d'émission  $\sigma_e$  (ou d'absorption  $\sigma_a$ ) des transitions d'ions actifs [19].

La figure (3-3) montre les spectres d'émission et d'absorption de l'erbium. On remarque d'une part que l'efficacité maximale (gain et largeur de bande) se trouve autour de la longueur d'onde centrale 1550 nm (correspondant au minimum d'atténuation de la fibre 0.2 dB/Km) et d'autre part, le spectre d'émission est décalé vers les longueurs d'onde les plus grandes contrairement au spectre d'absorption.

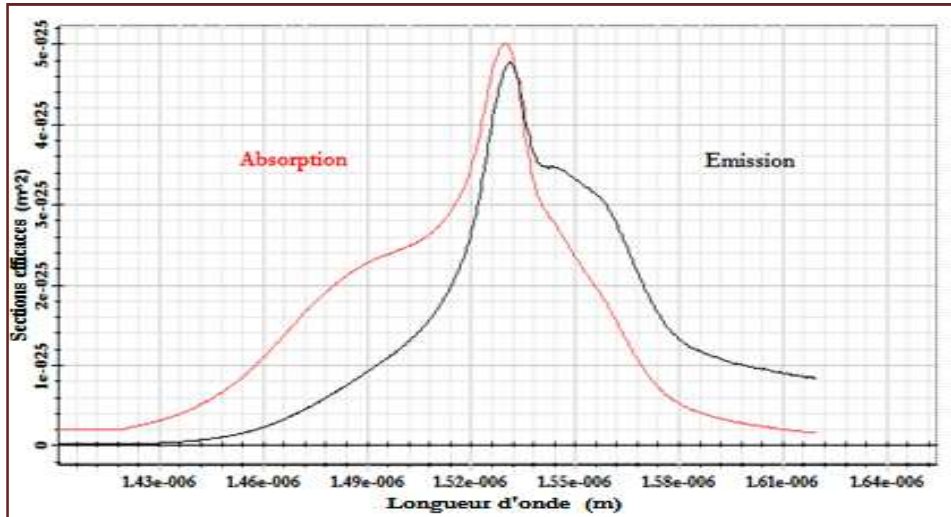


Figure 3.3 : spectres d'émission et d'absorption de l'erbium.

### 3.4.2 Structure de l'EDFA :

Les deux éléments de base de l'EDFA sont la fibre optique dopée à l'ion de terre rare (l'erbium pour l'amplification autour de 1550 nm) et le dispositif de pompage qui est en général fournie par une diode laser. Pour coupler la pompe optique et le signal à l'intérieur de la fibre, il faut un multiplexeur qui doit présenter une perte d'insertion faible et un isolateur afin d'optimiser le rendement optique du système (figure 3.4).

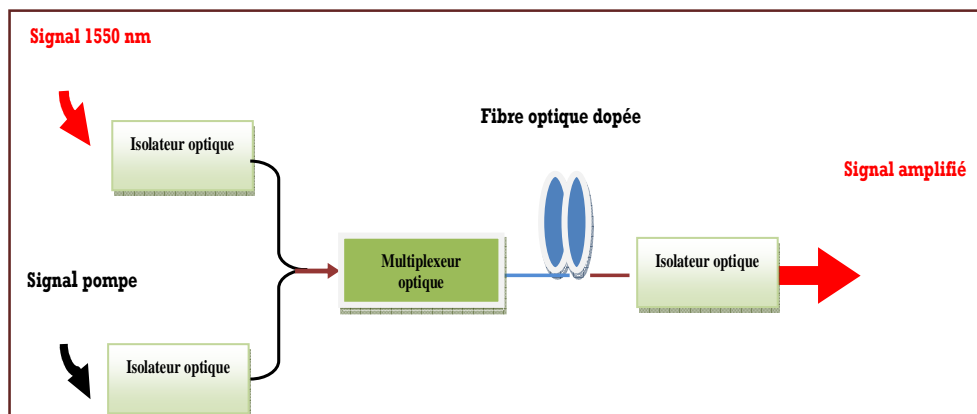


Figure 3.4 : schéma d'un amplificateur à fibre optique dopée à l'erbium.

#### a) Fibre dopée

La fibre dopée constitue l'un des principaux éléments de l'amplificateur optique. Elle représente le milieu dans lequel se réalise l'amplification grâce aux ions dopants qui la constituent. C'est une fibre monomode de quelques mètres de longueur, dont le cœur est dopé



par des ions d'erbium. Le gain de l'amplificateur dépend fortement des paramètres optogéométriques de cette fibre, à savoir, la concentration en ions d'erbium, la longueur de la fibre et le rayon de son cœur.

#### b) Pompe laser

Ce module constitue aussi un élément essentiel de l'amplificateur optique. C'est sur sa puissance qui est basé l'inversion de population favorisant l'amplification optique. La pompe est un laser à semi-conducteur, capable de produire de forte puissance en sortie, avec un faisceau monomodal pour garantir un bon couplage dans la fibre monomode. Les longueurs d'onde de pompe choisies sont 980 et 1480 nm, un pompage simultané à 980 et à 1480 nm offre un avantage propre à chacune des longueurs d'onde : un bruit réduit à 1480 nm et une puissance de saturation élevée avec un bon rendement à 980 nm [20].

#### c) Multiplexeur

Il permet de coupler, d'injecter simultanément dans la fibre amplificatrice, le signal utile et celle de pompe respectivement aux longueurs d'onde. Ce dispositif doit présenter une perte d'insertion faible aux deux longueurs d'onde afin d'optimiser le rendement optique du système.

#### d) Isolateur

C'est un dispositif passif ne permettant la propagation du signal que dans un sens. Placé à l'entrée, il arrête l'ESA contra-propagative et protège le laser émetteur de signal. En général, les isolateurs empêchent les bruits et toutes perturbations pouvant rendre le milieu oscillant. Placé en sortie, dans les préamplificateurs optiques, les isolateurs limitent les pertes qui dégradent le facteur de bruit.

### 3.4.3 Principe de fonctionnement :

Un amplificateur à fibre dopée fonctionne à la manière d'un laser. Une portion de fibre optique est dopée et est pompée optiquement avec un laser afin de placer les ions de dopage dans un état excité. Lorsqu'un signal lumineux passe à travers ce morceau de fibre optique dopée, il désexcite les ions par effet laser en produisant un photon en tout point identique au photon incident. Le signal lumineux a donc été doublé.

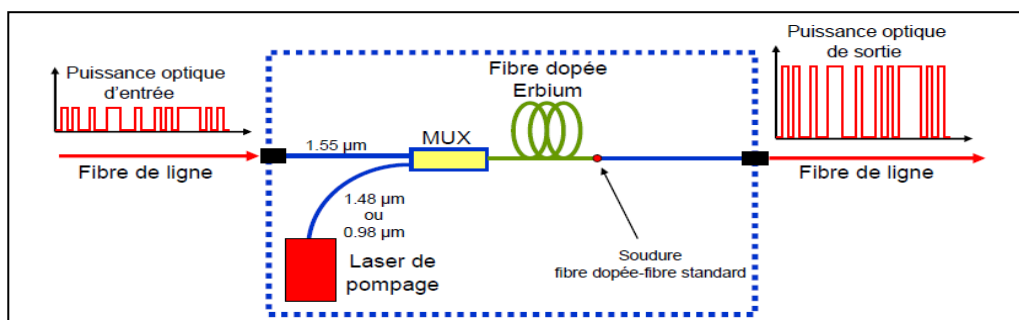


Figure 3.5 : principe de fonctionnement du l'EDFA

### 3.4.4 Configurations du pompage optique de l'EDFA :

On distingue deux cas selon que le signal utile et la pompe se propagent dans le même sens : schéma co-propagatif (figure 3.6.1) afin de réduire le facteur de bruit ou en sens inverse, schéma contra-propagatif (figure 3.6.2) favorisant ainsi une plus forte puissance de saturation [8, 19]. Mais afin d'augmenter l'inversion de population et donc l'amplification du signal, certains amplificateurs utilisent un couplage bidirectionnel (figure 3.6.3), c'est-à-dire deux pompes, une dans chacun des deux sens. Il existe deux longueurs d'onde pour le pompage optique de ce type d'amplificateur : 980 nm et 1 480 nm .

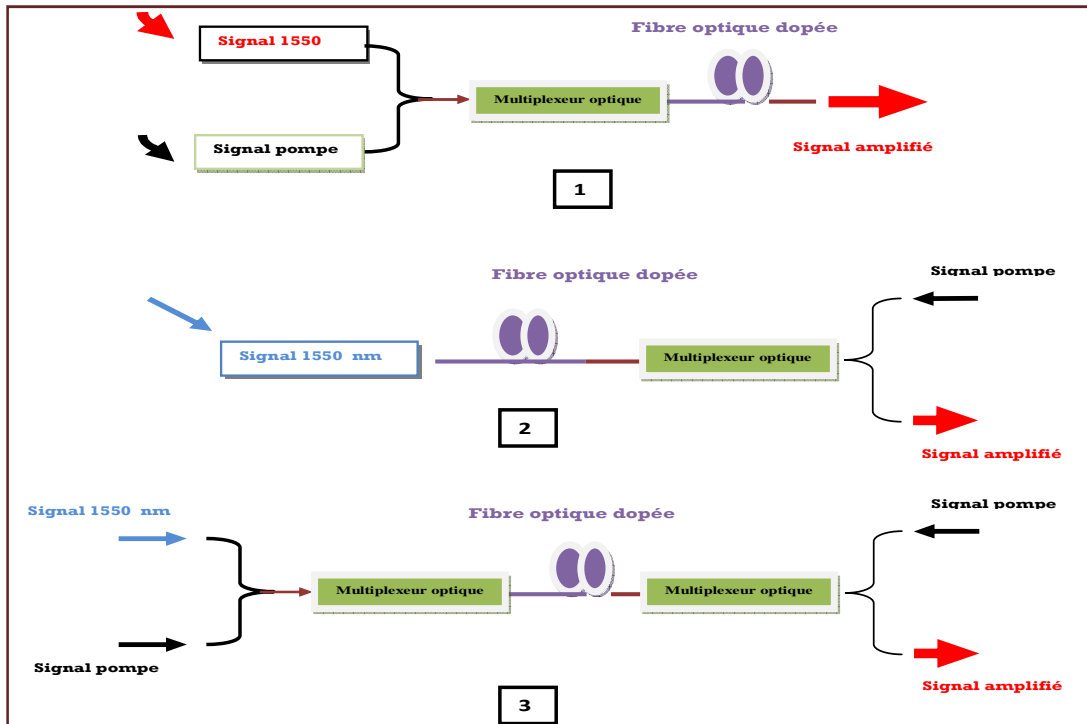


Figure 3.6 : (1) pompe copropagatif, (2) pompe contra propagatif et (3) pompe bidirectionnel.

### 3.4.5 Caractérisation de l'EDFA :

Les critères les plus courants qui caractérisent un EDFA sont : le gain, la puissance de saturation, le facteur de bruit et le rendement. Il faut cependant noter que ces valeurs dépendent de la longueur de la fibre dopée erbium, de la longueur d'onde du signal et de la puissance de signal de pompe.

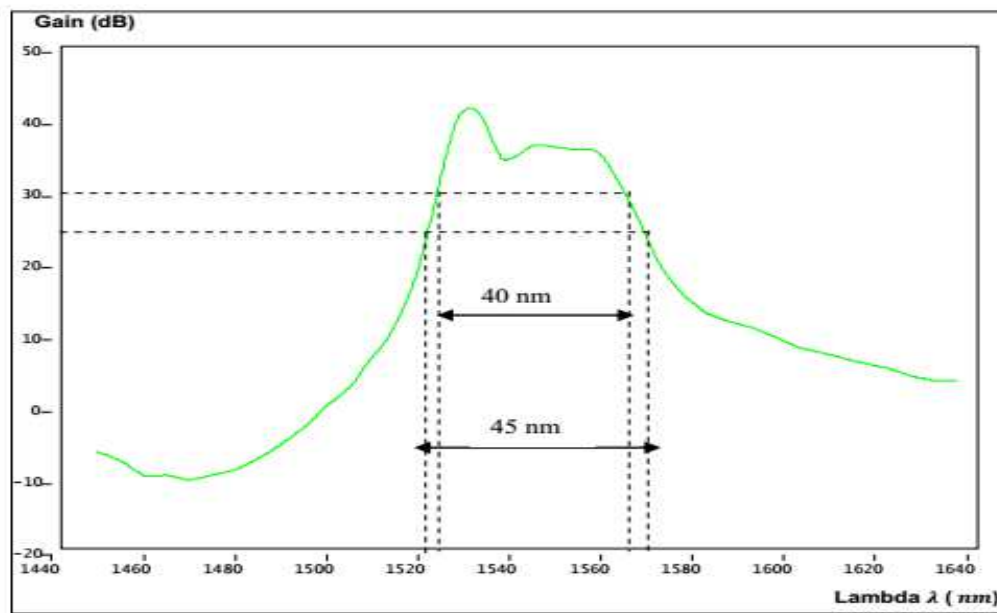
#### a) Gain optique :

Le gain d'un amplificateur optique traduit l'augmentation du signal dans la fibre, il est habituellement mesuré en décibels. Il est défini par Derickson [21]:

$$G = \frac{P_s - P_{ASE}}{P_e} \quad (3.2)$$

Où  $P_s$  est la puissance optique à la longueur d'onde du signal à la sortie de l'amplificateur,  $P_{ASE}$  est la puissance de l'émission spontanée amplifiée dans la même bande de fréquence que le signal et  $P_e$  est la

puissance du signal d'entrée.



**Figure 3.7 :** spectre de gain en fonction de la longueur d'onde.

Deux paramètres sont très importants sur ce spectre de gain. Un paramètre en abscisse, qui définira la bande passante, et un paramètre en ordonnée qui définira la platitude du gain de notre amplificateur. On remarque bien que la valeur optimale obtenue du gain est de 30 dB, avec une importante bande passante de 40 nm. Nous pouvons atteindre des gains allant jusqu'à 40 dB au détriment de la platitude du gain (présence de fluctuations) ce qui constitue un problème majeur dans les systèmes WDM.

**b) Emission spontanée amplifiée et le facteur de bruit :**

Quelques ions retombent dans l'état fondamental sans avoir été stimulés par un photon de signal et émettent un photon dit 'spontané'. Ces photons spontanés se propagent dans la fibre et stimulent eux-mêmes l'émission d'autres photons : c'est l'émission spontanée amplifiée (ESA) qui constitue la source de bruit des amplificateurs optiques [20, 21]. Elle s'exprime par sa densité spectrale de puissance (figure 3.8), donnée par :

$$P_{ESA} = 2n_{sp}(G - 1)h\nu \cdot B \quad (3.3)$$

$h\nu$  : énergie du photon

$h$  : constante de Planck

$n_{sp}$  : Taux d'émission spontanée

$B$  : la bande passante optique

Ainsi, le facteur de bruit s'écrit :

$$F = \frac{\sigma_e}{\sigma_s} = 2n_{sp} \frac{G-1}{G} + \frac{1}{G} \quad (3.4)$$

La figure (3.8) : montre le spectre de puissance de bruit de l'émission spontanée amplifiée (ESA) et le spectre du gain. Le niveau de bruit est très faible (-110 dBm/Hz) par rapport à celui du signal. On

remarque que le spectre de l'ESA à la même allure que celui du gain, ceci s'explique par le fait que le bruit de l'ESA accompagne inévitablement le processus de l'amplification.

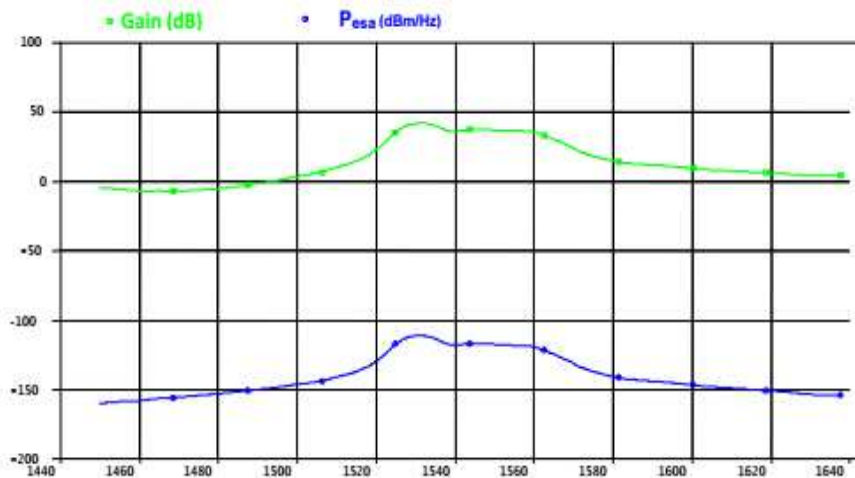


Figure 3.8 : spectre de l'ESA et spectre du gain en fonction de la longueur d'onde.

c) **Le rendement** [1, 21] :

Le rendement d'un amplificateur est défini comme étant le rapport du gain (en dB) à la puissance de pompe injectée dans la fibre (en mW). Il est donné en (dB/mW) par :

$$\eta = \frac{\lambda_s}{\lambda_p} \frac{P_s - P_e}{\lambda_p} \quad (3.6)$$

Avec :

- $\lambda_s$  : longueur d'onde du signal
- $\lambda_p$  : longueur d'onde de pompe
- $P_s$  : puissance du signal en sortie
- $P_e$  : puissance du signal à l'entrée

La figure 3.9 présente les rendements maximaux des différentes longueurs d'onde de pompe. Le meilleur rendement (environ 80 %) est obtenu avec une longueur d'onde de pompe de 980 nm.

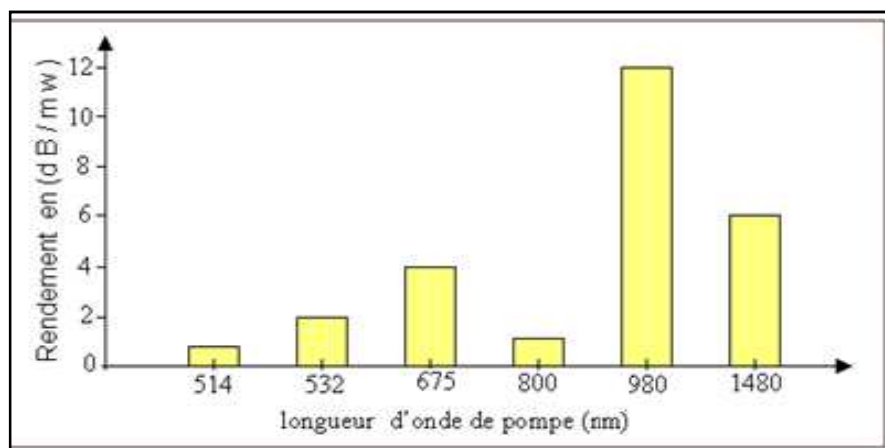


Figure 3.9 : rendements de pompage des amplificateurs optiques pour différentes longueurs d'onde de pompe.

#### d) La saturation :

Le gain dépend de la puissance d'entrée (figure 3.10). Pour les faibles puissances d'entrée, le gain est constant et le régime de fonctionnement est linéaire : on parle alors de gain en petit signal. A forte puissance, l'amplificateur commence à saturer, cette saturation du gain est caractérisée par un paramètre appelé puissance de saturation  $P_S$ .

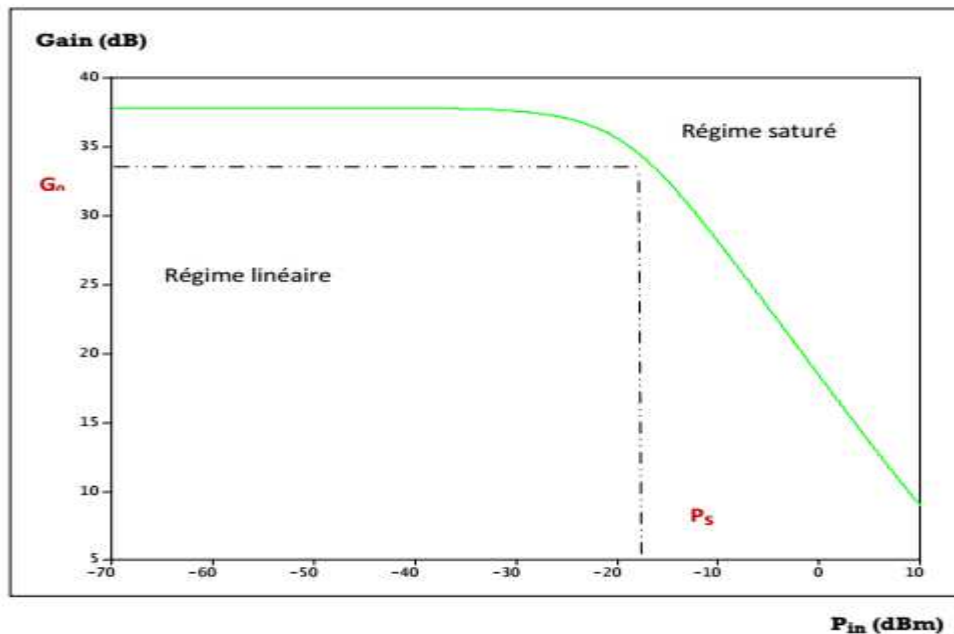


Figure 3.10 : variation du gain en fonction de la puissance d'entrée.

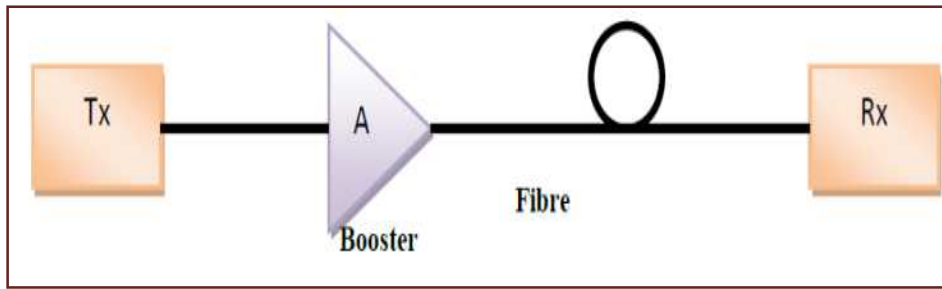
#### 3.4.6 Applications des amplificateurs optiques :

L'EDFA est utilisé dans une ligne de télécommunication de trois façons différentes, au début de la ligne, en tant que post-amplificateur, le long de la ligne en tant qu'amplificateur en ligne, et en fin de ligne en tant que pré-amplificateur.

##### ➤ Post- amplificateur EDFA :

Les post-amplificateurs ou booster placés juste après l'émission (figure 3.11), ont pour rôle d'augmenter la puissance de sortie de l'émetteur et donc d'accroître d'autant le budget total de la liaison [2, 16]. Il reçoit un signal de puissance relativement élevée et de grand rapport signal sur bruit. Il doit donc avoir une puissance de saturation élevée, le facteur de bruit ayant dans ce cas un rôle moins important. Les principaux avantages de ce type d'amplificateurs sont:

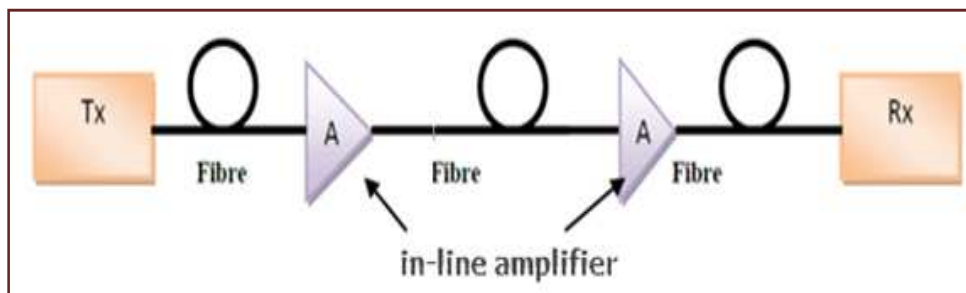
- Augmenter la distance des réseaux optiques « medium-haul » .
- Augmenter le budget de puissance et réduire le nombre d'amplificateurs en ligne dans les liaisons long-haul.
- Amplifier simultanément des signaux WDM.



**Figure 3.11 :** *amplificateur optique à l'émission (Booster) .*

➤ **Amplificateur de ligne EDFA :**

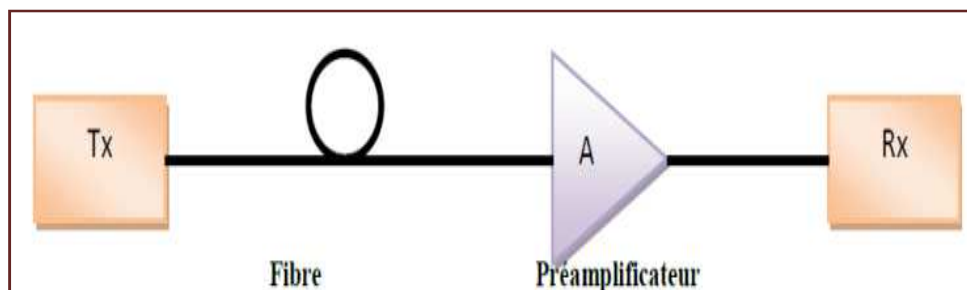
Les amplificateurs en ligne sont pour fonction de compenser l'atténuation du signal par la fibre et les différentes pertes encourues tout en favorisant l'augmentation de la distance de propagation (figure 3.12).



**Figure 3.12:** *amplificateur optique en ligne.*

➤ **Préamplificateur EDFA :**

Le préamplificateur est placé juste avant le photodétecteur (figure 3.13) pour permettre au signal d'avoir une puissance suffisante pour être détecté dans de bonnes conditions. Il reçoit un signal de très faible puissance et doit donc avoir un très faible facteur de bruit et être capable d'amplifier un signal de faible puissance. Les pertes lors du couplage en entrée de l'amplificateur doivent être réduites vu que l'on a un signal faible en entrée et que l'on veut minimiser le bruit.



**Figure 3.13:** *amplificateur optique à la réception (préamplificateur).*

### 3.4.7 Performances de l'EDFA :

Les performances de ces amplificateurs dépendent bien entendu de la concentration d'ions à terre rare dans la fibre, du niveau de la pompe, de la puissance du signal à l'entrée de l'amplificateur, de la longueur d'onde du signal, ou encore de la longueur de la fibre. En général, un compromis est à faire entre les principaux critères de performance que sont le gain, le rendement, la puissance de saturation et le facteur de bruit. Les principales limitations en performance du dispositif sont la faible concentration en Erbium que l'on peut insérer dans le matériau à cause du couplage entre ions trop proches restreignant la valeur maximum du gain.

#### ➤ . Avantages de l'EDFA

- Excellent couplage : le milieu amplificateur est une fibre monomode.
- Gain important.
- Pas de distorsion à haut débit (large bande passante).
- Peu sensible à la température.
- Insensibilité à la polarisation à l'inverse des amplificateurs à semiconducteur.

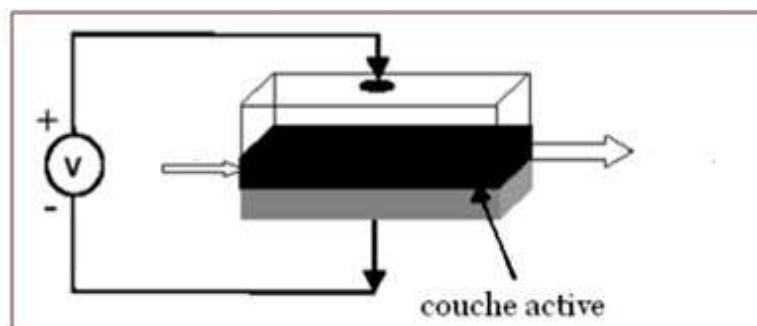
La véritable révolution est venue des avantages que cette technologie pouvait procurer en association avec le multiplexage en longueur d'onde (WDM Wavelength Division Multiplexing).

#### ➤ Inconvénients de l'EDFA

- Nécessité d'un laser de pompe.
- Difficulté d'intégration.
- Actuellement limité à la longueur d'onde centrale de 1550 nm.

### 3.5 Amplification optique à semi-conducteur (AOSC) :

Un amplificateur optique à semi-conducteur utilise le même principe de fonctionnement que la diode laser. La structure est quasiment la même, avec deux plaques d'un matériau semi-conducteur prenant en « sandwich » un autre matériau formant la région active. Un courant électrique est appliqué à la structure obtenue, dans le but d'exciter les électrons [21].



**Figure 3.14:** configuration de base d'un amplificateur optique à semi-conducteur.

Tout comme les amplificateurs à fibre optique dopée, les amplificateurs à semiconducteurs peuvent amplifier les signaux dans une bande de fréquence assez large. Ils permettent d'obtenir un meilleur gain aux deux fenêtres de télécommunications optiques, à savoir 1300 et 1550 nm.

### **3.6 Conclusion :**

L'apparition de l'amplificateur à fibre optique dopée erbium a eu des conséquences fondamentales : il devient possible, grâce à ce dispositif pratiquement utilisable dans un système de transmission travaillant à 1.55  $\mu\text{m}$ , de compenser l'atténuation apportée par la fibre et de fabriquer, ainsi en insérant périodiquement des amplificateurs dans une liaison, un milieu de propagation sans pertes sur une très grande distance. Cette notion trouve son application dans les systèmes sous marins sur fibre optiques qui seront prochainement installés et comporteront un très grand nombre d'amplificateurs. De même, utilisé en préamplificateur, l'amplificateur à fibre permet d'améliorer considérablement la sensibilité des récepteurs optiques.



# Principe d'une liaison par fibre optique

## Chapitre 4 Principe d'une liaison par fibre optique

### 4.1 Introduction :

Les technologies de télécommunication par fibre optique sont en constante amélioration permettant ainsi de transmettre des informations sur de très longues distances et à très hauts débits, surtout avec le développement du laser dont l'intérêt majeur réside dans le transport de l'information (image, vidéo, son...) sous forme d'un signal lumineux [1]. Dans ce chapitre nous allons décrire un système de transmission optique, la composition de la fibre optique ses caractéristique, ses avantages ainsi que ses inconvénients.

### 4.2. Principe d'une liaison par fibre optique :

Le principe dans les communications optiques consiste à transporter de l'information sous forme lumineuse d'un point à un autre à travers d'une fibre optique. L'information à transmettre est convertie d'un signal électrique en signal optique grâce à un émetteur, elle est ensuite injectée dans une fibre optique. A la réception, le signal subira le traitement inverse à savoir la conversion optique-électrique grâce à un récepteur optique [22]. Cependant, pour des grandes distances on utilise des amplificateurs optiques pour conserver le niveau du signal nécessaire à la restitution de l'information.

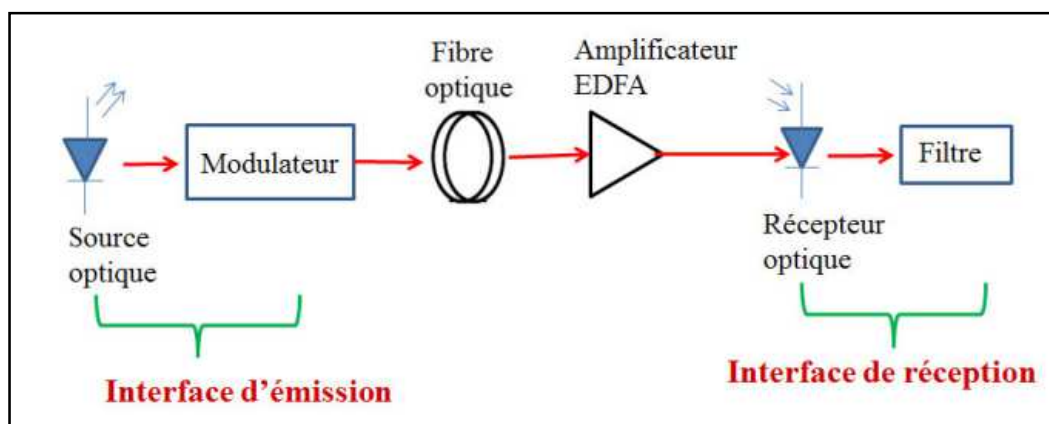


Figure 4.1 : Schéma synoptique d'un système de transmission optique.

#### 4.2.1 Emetteur optique :

La partie émission d'une liaison optique est composée d'une diode électroluminescente (LED), ou une diode laser et un modulateur, son rôle est de délivrer au support de transmission un signal optique sur lequel sont inscrites les données.

#### 4.2.2 Modulateurs:

Afin de transmettre des informations dans les systèmes numériques optiques, il faut les imprimer sur le signal à envoyer dans la fibre, c'est ce que l'on appelle une modulation, qui est une fonction essentielle de tout système de transmission. Pour réaliser la modulation d'émission, on a deux possibilités :

##### a. Modulation directe

C'est la propre source optique qui réalise la modulation en même que la transformation électrique-optique. La modulation du courant qui traverse un laser à semi-conducteur entraîne directement la modulation en intensité de la lumière émise. Il suffit d'inscrire les données sur l'alimentation du laser. Un inconvénient de cette méthode est que lorsque l'on module en amplitude le courant d'injection d'un laser est accompagné d'une modulation de fréquence parasite. Ces effets, conjugués à la dispersion chromatique de la fibre, provoquent un élargissement de l'impulsion d'autant plus importante que la longueur de la fibre est grande [3].

##### b. Modulation externe

L'émetteur est alors constitué d'une source optique émettant une onde pure suivie d'un modulateur externe. Le courant d'injection du laser n'est plus modulé. La modulation externe présente de nombreux avantages. Elle est plus rapide et permet donc d'envoyer des débits plus élevés [3].

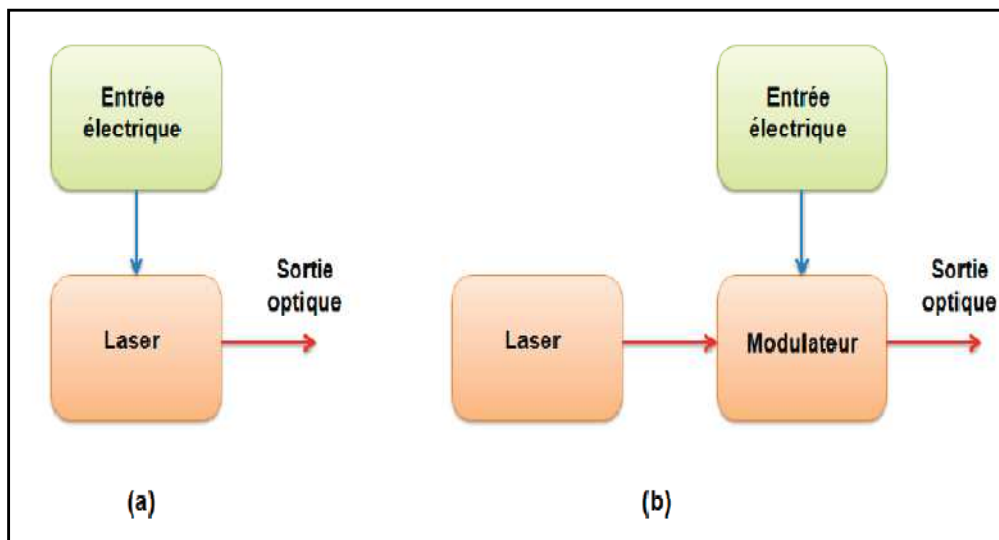


Figure 4.2 : schéma synoptique (a) d'une modulation directe et (b) modulation externe.

### 4.2.3 Récepteur optique :

En réception, le signal est détecté puis analysé. La chaîne de détection est représentée sur la figure (4.3). Elle est constituée d'une photodiode rapide qui convertit le signal optique en photo-courant. Le signal est ensuite amplifié dans un amplificateur limiteur permettant de maintenir une puissance électrique moyenne constante. Un filtre permet de limiter le bruit électrique reçu par un circuit de décision. Une partie du signal est envoyée sur une récupération d'horloge. Le signal est enfin injecté sur le circuit de décision.

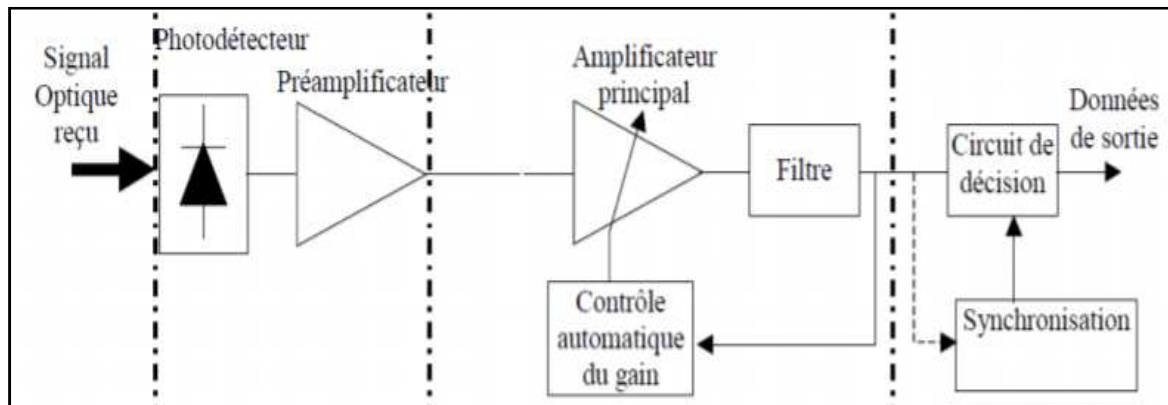


Figure 4.3 : schéma synoptique d'un récepteur optique.

#### a) La décision :

Pour une récupération parfaite des données transmises, une remise en forme du signal détecté est donc nécessaire en utilisant un bloc de 'récupération des données' composé d'un détecteur à seuil (qui permet de déterminer le seuil de décision) et d'un circuit de récupération de rythme, encore appelé circuit de synchronisation (qui permet de déterminer l'instant de décision). Leur tâche est de comparer le signal de données à un certain seuil d'amplitude, puis de décider le niveau correspondant du signal (« bit 1 » ou « bit 0 »), et ceci à chaque front d'horloge. L'horloge doit être synchronisée sur le signal incident.

Pour pouvoir reconstituer la séquence binaire, il nous faut donc prélevé un échantillon dans chaque temps symbole.

- ✓ Si l'intensité détectée à l'instant de décision est supérieure au seuil de décision, alors le symbole est un « 1 ».
- ✓ Si l'intensité détectée à l'instant de décision est inférieure au seuil de décision, alors le symbole est un « 0 ».

### 4.3 Critères d'évaluations des performances d'un système de transmission [7, 23]:

Lors de la transmission d'un signal optique dans un réseau fibre, le signal subit plusieurs dégradations. Afin de juger la qualité du signal transmis, des critères sont utilisés après la réception du signal. Ces critères représentent des paramètres de tests dans le but d'évaluer la qualité de la transmission. Trois paramètres sont importants à savoir : le facteur de qualité  $Q$ , le diagramme de l'œil et le taux d'erreur

binaire « TEB ou bien BER en anglais », ces critères sont décrits au fur et à mesure des simulations entreprises.

#### 4.3.1 Diagramme de l'œil :

Le diagramme de l'œil est une méthode de visualisation de la qualité du signal en termes de bruit d'amplitude, d'interférences inter symboles ou de gigue temporelle. Il est défini par la superposition d'un grand nombre de symboles binaires dans le domaine temporel.

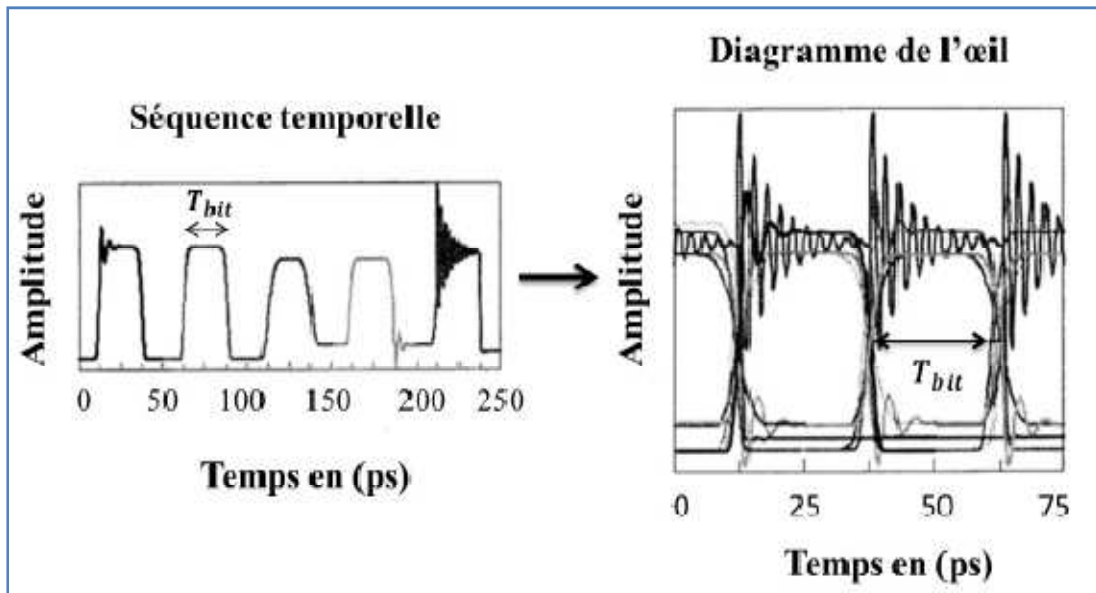
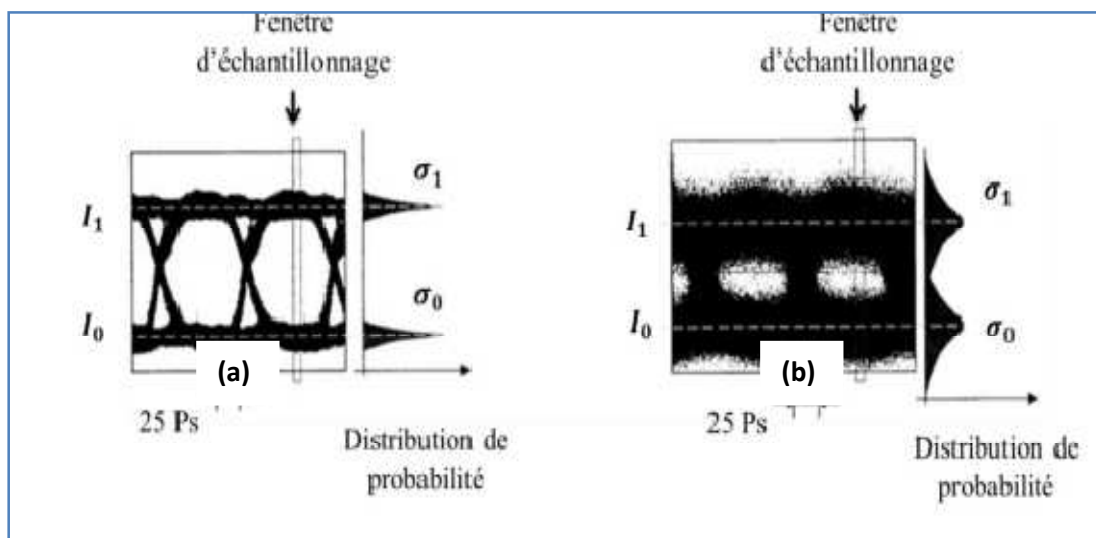


Figure 4.4 : (a) séquence temporelle et (b) diagramme de l'œil.

A partir du diagramme de l'œil, nous pouvons facilement constater la qualité du signal. Si les niveaux des symboles « 1 » sont bien distincts des niveaux des symboles « 0 », nous dirons que l'œil est ouvert. Par contre, si la dégradation est de telle sorte que nous ne pouvons plus distinguer entre les deux niveaux, on parle d'un œil fermé soit horizontalement ou verticalement. La figure illustre un exemple d'un diagramme de l'œil pour le cas d'un signal de bonne qualité (a) et d'un signal bruité (b).



**Figure 4.5 :** diagramme de l'œil pour (a) signal de bonne qualité et (b) signal bruité.

#### 4.3.2 Taux d'erreur binaire :

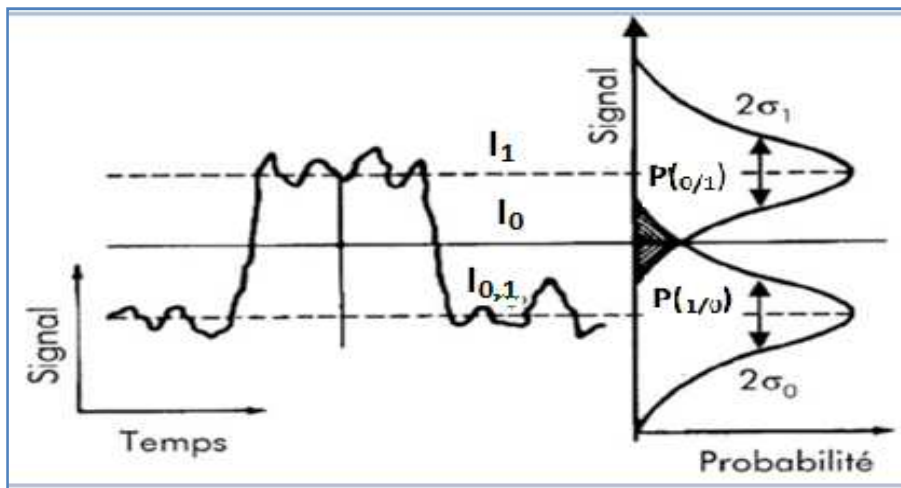
Le taux d'erreur binaire TEB d'une liaison est le rapport entre le nombre d'erreurs et le nombre de bits transmis. Statistiquement il s'agit de la somme de la probabilité qu'un bit 1 soit détecté comme un bit 0 et de la probabilité qu'un bit 0 soit détecté comme un bit 1. En pratique il est courant d'extrapoler la mesure de BER pour la mesure d'un nombre d'erreurs très faibles car si l'on veut un BER de  $10^{-12}$  il faut pouvoir compter une erreur sur un téra-bit transmis. Le TEB habituellement accepté pour une transmission de bonne qualité est inférieur à  $10^{-9}$ .

$$TEB = \frac{\text{Nombre d'erreurs}}{\text{Nombre de Bits transmis}} \quad (4.1)$$

#### 4.3.3 Facteur de qualité Q :

Il est possible aussi de mesurer les performances des transmissions avec le facteur de qualité Q. Une autre approche, plus qualitative, consiste à tracer le diagramme de l'œil du signal, en évaluant les valeurs des états hauts et bas  $I_1$  et  $I_0$ , ainsi que leurs incertitudes  $\sigma_1$  et  $\sigma_0$ . On définit le facteur de qualité, dans ce cas par :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (4.2)$$



**Figure 4.6 :** facteur de qualité.

On montre qu'il est possible d'estimer le Taux d'Erreur Binaire (TEB) à partir de Q pour une statistique Gaussienne des bruits :

$$TEB = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad \text{avec} \quad 1 - \operatorname{erf}(z) \approx \frac{e^{-z^2}}{2\sqrt{\pi}} \quad (4.3)$$

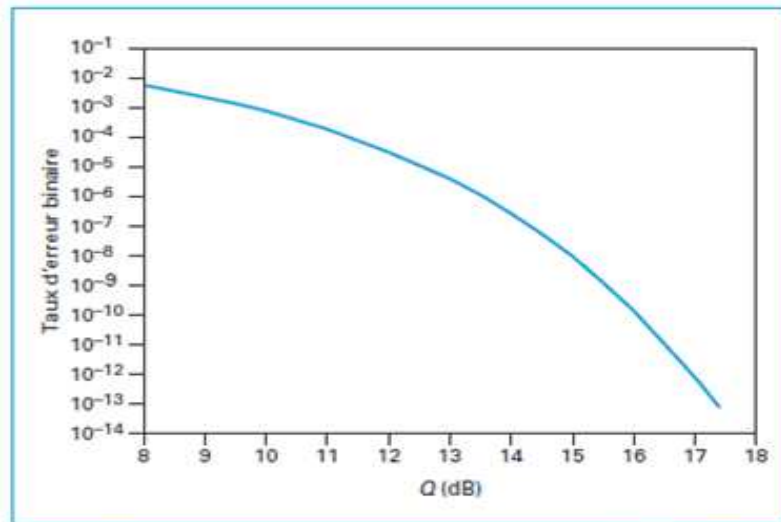


Figure 4.4 : relation entre le facteur  $Q$  et le taux d'erreur binaire  $TEB$ .

#### 4.4. Bilan d'un système de transmission optique :

L'analyse des performances d'une liaison de transmission par fibre optique nécessite la réalisation d'un bilan optique, ce qui permet d'identifier le degré d'imperfection de la ligne pour un système de communication, des techniques de mesures ont été mises en place dans le but d'avoir un maximum d'informations sur ces liaisons [24]. Le bilan de liaison nous permet d'obtenir des informations tels que :

- ◆ La distance maximale de transmission avec moins de pertes.
- ◆ L'évolution de la bande passante tout au long de la fibre.
- ◆ La position des phénomènes inhabituels (coupure et courbure).

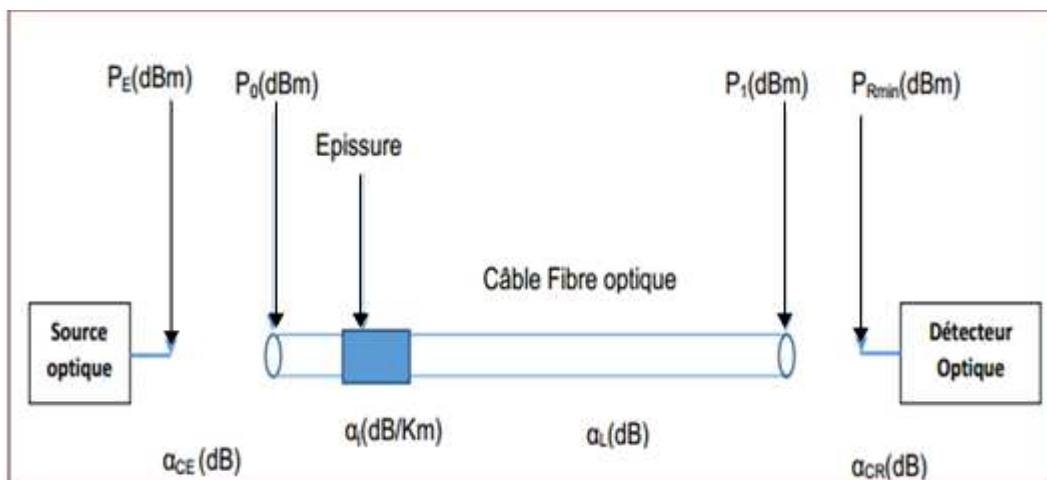


Figure 4.5: schéma synoptique d'une liaison optique point à point sans répéteur.

Avec :

$P_E$  : puissance rayonnée par la source optique.

$P_0$  : puissance injectée dans la fibre.

$P_1$  : puissance à la sortie de la fibre.

$P_{Rmin}$  : puissance minimal capté par le détecteur.

$\alpha_{CE}$  : affaiblissement du couplage source/fibre.

$\alpha_j$  : affaiblissement des jonctions(Épissures).

$\alpha_L$  : affaiblissement Linéaire (caractéristique de fabrication).

$A_{CR}$  : affaiblissement du couplage fibre/détecteur.

#### **4.4.1 Affaiblissement globale de la propagation :**

Pour calculer l'affaiblissement on prend les conditions où notre canal n'est pas dispersif (conditions théorique), c'est à dire une fibre parfaite, qui ne présente aucun défaut (pas de dispersion). Avec une connaissance préalable de la puissance émise par la source ainsi que la puissance reçus, on est capable de déterminer les pertes totales admises qui seront réparties entre les différents éléments du canal de transmission (couplage, fibre et épissures).

L'affaiblissement total peut être calculé :

$$\alpha_{Tot} = 10 \log \frac{P_E}{P_R} \quad (4.4)$$

#### **4.4.2 Pertes totales dans un canal de transmission:**

La perte totale exprimée en décibel (dB) est la somme de toutes les pertes des différents éléments du canal elle est donnée par la relation suivantes :

$$\alpha_{Tot} = \sum_{j=1}^N \alpha_j + \alpha_L \cdot L + A_{CR} \quad (4.5)$$

Avec,

L : longueur du câble.

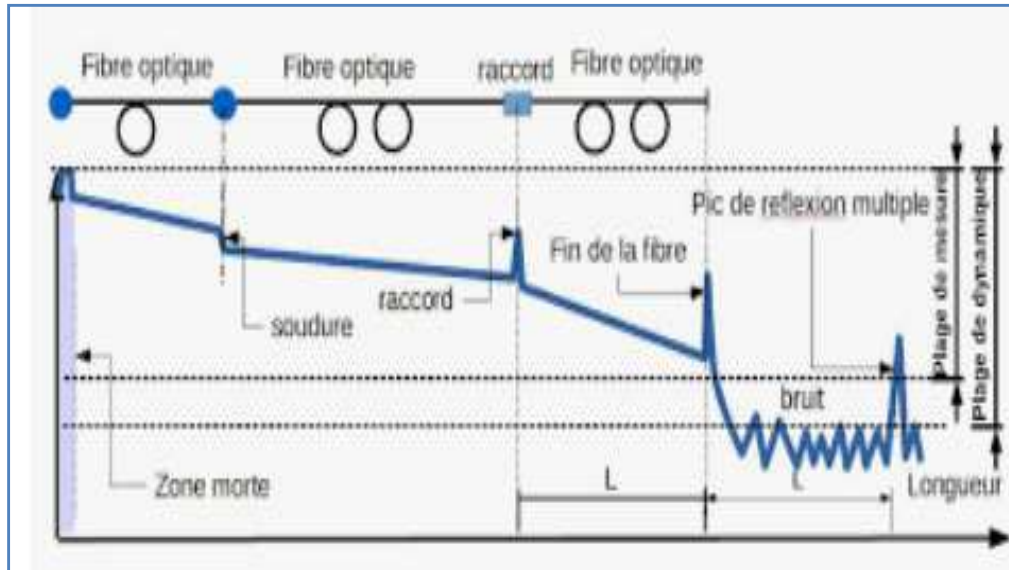
N : nombre d'épissure.

### **4.5. Principe de mesure avec un OTDR :**

Le principe consiste à injecter des impulsions de lumière dans le réseau de fibre et analyser la lumière diffusée par la fibre [25]. Lorsqu'on envoie une impulsion de lumière de grande puissance dans une fibre, on constate que la puissance transmise en sortie est plus faible que la puissance d'entrée : une partie de l'énergie lumineuse est diffusée par le matériau constituant le guide chaque section élémentaire de fibre renvoie vers la source une partie infime de la lumière incidente.



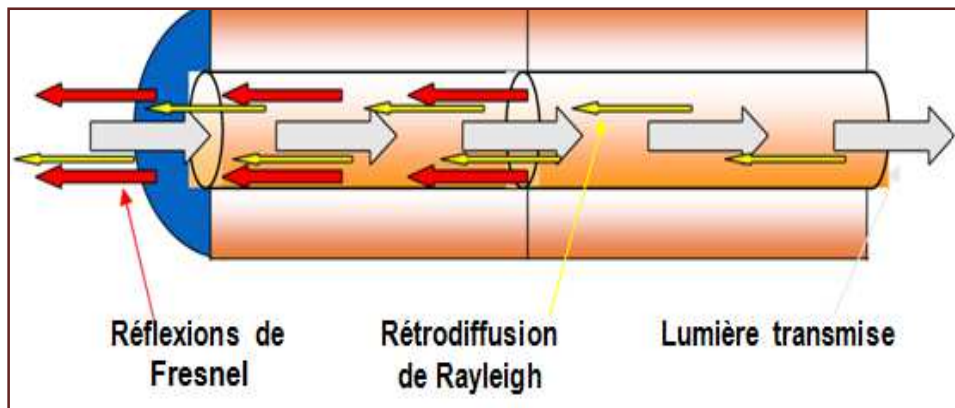
En détectant cette lumière rétrodiffusée, on recueille un signal qui est, une fois analysé, il permet d'évaluer l'atténuation de la fibre, sa longueur, la présence, la position d'un défaut et l'atténuation due à un connecteur. La figure ci-dessous donne le principe de mesure de l'OTDR.



**Figure 4.6 :** principe de mesure (OTDR).

Un OTDR utilise les effets de dispersion de Rayleigh et de réflexion de Fresnel pour analyser l'état des fibres, mais la réflexion de Fresnel est de plusieurs dizaines de milliers de fois supérieure à la rétrodiffusion en termes de puissance.

- La dispersion de Rayleigh se produit lorsqu'une impulsion se déplace sur la fibre et que de petites variations dans le matériau, telles que les variations et discontinuités de l'indice de réfraction, provoquent la dispersion de la lumière dans toutes les directions. Cependant, le phénomène de petites portions de lumière se réfléchissant directement vers le transmetteur est appelé rétrodiffusion [26].
- Les réflexions de Fresnel se produisent lorsque la lumière traversant la fibre rencontre des changements brusques dans la densité du matériau qui peuvent survenir lors des connexions ou de coupures en présence d'un entreraît. Une très grande quantité de lumière est réfléchiée par rapport à la dispersion de Rayleigh. L'intensité de la réflexion dépend du degré de changement dans l'indice de réfraction.



**Figure 4.7 :** *rétrodiffusion de Rayleigh et réflexion de Fresnel.*

#### **4.6. Conclusion:**

Nous savons maintenant, que la lumière lorsqu'elle entre d'un bout d'une fibre optique, elle ne sort pas de la même forme. Ceci est dû à des phénomènes divers et complexe que la lumière rencontre durant sa propagation, ce qui peut présenter soit des avantages, soit des inconvénients pour les systèmes optiques. La lumière se propage sous forme d'onde, qui selon le milieu, peut subir de l'absorption, réflexion, réfraction, diffraction, dispersion et les pertes de connectique. Donc, l'étude et l'analyse de la propagation de la lumière dans la fibre optique a une grande importance dans l'évaluation et l'optimisation des performances des systèmes optiques.

## Référence :

- [1] : Irène et Michel Joindot, " Les télécommunications par fibres optiques ". Dunod, Paris, 1996.
- [2] : Jean-Louis Verneuil, " Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s ". Thèse de Doctorat, université de Limoges 2003.
- [3] : Bendriham Abdelaziz, " Etude des phénomènes liés à la propagation dans les fibres optiques", Thèse de Magister, université de Batna, 2005.
- [4] : Stéphane Dellier, " Contributions à la conception des circuits micro-ondes ". Thèse de Doctorat, université de Limoges, Juillet 2005.
- [5] : Nassima Boudrioua, " Étude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique : vers une compensation électronique de la PMD ". Thèse de Doctorat, 2007.
- [6] : Younes Zouine, " Contribution par la simulation système à l'étude des contraintes des composants optoélectroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA ". Thèse de Doctorat, université de Limoges le 17 Octobre 2005.
- [7] : Jérôme Laurent "Communication optique à très hauts débits". Examen probatoire présenté à la conservation nationale des Arts et Métiers de Paris départements STIC spécialité électronique, 2004.
- [8] : Fondamentaux du câblage : <https://beldencables-emea.com/fr>.
- [9] : Fibres-Optiques-eBook-WEB <https://www.generalcable.com>.
- [10] : FTTH "Installation, raccordement, soudure et dépannage de la fibre optique". <http://www.c2rp.fr/formation>.
- [11] : E. Cassan, " Une introduction aux télécommunications optiques pour la simulation de systèmes simple ", site web J3eA-BibSciences.org, 2(2003) 1-29.
- [12] : LED - Diode Électro-Luminescente - Cours d'électronique. [www.elektronique.fr](http://www.elektronique.fr)
- [13] : Aouiti Adel, " Etude lasers à base d'hétérostructure de semi conducteur III-V ". Thèse de magister, université de El-Hadj Lakhder – Batna, 2006.
- [14] : Talbi Ahmed, "étude et optimisation des paramètres physiques d'une diode laser monomode à contre réaction répartie DFB à base de GaInPSb/InP ", 2015.
- [15] : Romain Maciejko, "Optoélectronique ". <http://www.books.google.fr>
- [16] : Abdelhakim Boudkhil, Asmaâ Ouzzani, Belabbes Soudini, "Evaluation des Performances des Photodiodes PIN et APD dans une Chaîne de Communication Optique à Haut Débit ".
- [17] : Julien Maury, " Étude et caractérisation d'une fibre optique amplificatrice et compensatrice de dispersion chromatique ". Thèse de doctorat de l'université de Limoges, le 26 novembre 2003.
- [18] : Benoit Viallet, " Conception d'un amplificateur optique à 1,3  $\mu\text{m}$  : spectroscopie de couches minces de LaF3 dope Nd<sup>3+</sup> et développement de procédés technologiques innovants ". Thèse de Doctorat soutenue le 17 décembre 2004.
- [19] : Ghomazi Mehdi, " Optimisation des performances d'une fibre optique dopée à l'erbium " Mémoire de Magister soutenue le décembre 2009.

- [20] : Peretti Romain, “ Saturation spectrale de gain dans les amplificateurs à fibres dopées erbium : largeurs homogène et inhomogène et approche des nanomatériaux”, université de Lyon I, 2008.
- [21] : A. Boyoguéno Bendé, M. A. Duguay, P. Fortier, ” Étude sur l’amplification en ligne des systèmes de communication optique” ,1995.
- [22] : H. Itgarets, N. Rezkellah, “Optimisation des Paramètres d’une liaison A fibre optique”, Thèse de doctorat, université Abderrahmane Mira Bejaia, Algérie, (2015).
- [23] : OTDR pour OV-1000 Guide d’utilisation, document CT JIJEL (2017) .
- [24] : G. Richard, “Detection et analyse des événements optiques dans les réseaux FTTx”, ISATEL Electronic AG (2014).
- [25] : Agilent Technologies GmbH, “ Guide de poche de l’OTDR”, 2001.
- [26] : EXFO, “OTDR Réflectomètre optique temporel”, Guide d’utilisateur, (2010).